



Carbfix



MANNVIT

Niðurdæling CO_2 til geymslu í jörðu á Hellisheiði

Umhverfismatsskýrsla

Janúar 2023

Efnisyfirlit

Samantekt	iv
1 Inngangur	1
1.1 Forsaga	1
1.2 Stutt um áform Carbfix.....	1
1.3 Carbfix tæknin.....	4
1.4 Núverandi staða umhverfismats	5
1.5 Framsetning og umsjón með umhverfismatsskýrslu	5
2 Umhverfismat framkvæmda - matsferlið.....	7
2.1 Markmið umhverfismats og málsmeðferð	7
2.2 Tímaáætlun og aðkoma almennings að mati á umhverfisáhrifum	7
2.3 Forsamráð.....	8
2.4 Matsáætlunarstig	8
2.5 Mat á umhverfisáhrifum	10
3 Markmið og forsendur	11
3.1 Tilgangur og markmið framkvæmdar	11
3.2 Bakgrunnur niðurdælingar á Helligheiði	11
3.3 Niðurdæling CO ₂ til geymslu í jarðlögum	12
4 Valkostir.....	18
4.1 Valkostur sem er metinn	18
4.2 Núll kostur – óbreytt ástand.....	20
5 Helstu framkvæmdaþættir og einkenni þeirra.....	22
5.1 Niðurdælingarverkefni Carbfix á Helligheiði	22
5.2 Borholur	26
5.3 Byggingar.....	27
5.4 Lagnir	29
5.5 Samantekt framkvæmda.....	33
5.6 Framkvæmdatími	33
5.7 Frágangur og niðurrif	35
5.8 Lokunaráætlun.....	37
5.9 Leyfisveitingar samstarfsaðila	38
6 Upplýsingar um tengdar framkvæmdir.....	40
6.1 Föngun CO ₂ úr útblæstri Helligheiðarvirkjunar	40

6.2	Föngun CO ₂ úr andrúmslofti í Jarðhitagarði ON	41
6.3	Framkvæmdir nýrra aðila.....	44
6.4	Vatns- og rafmagnsnotkun	45
7	Aðferðafræði við umhverfismat	46
7.1	Viðmið, einkenni og vægi umhverfisáhrifa.....	46
7.2	Athugunarsvæði og áhrifasvæði framkvæmdar	48
7.3	Áhrifa- og umhverfispættir	51
8	Geymslugeymir	53
8.1	Matsspurningar	53
8.2	Rannsóknir, fyrirbyggjandi gögn og viðmið.....	53
8.3	Grunnástand	59
8.4	Umhverfisáhrif.....	64
8.5	Niðurstaða umhverfismats.....	79
9	Grunnvatn.....	81
9.1	Matsspurningar	81
9.2	Rannsóknir, fyrirbyggjandi gögn og viðmið.....	81
9.3	Grunnástand	82
9.4	Umhverfisáhrif.....	87
9.5	Niðurstaða umhverfismats.....	91
10	Jarðskjálftavirkni.....	92
10.1	Matsspurningar	92
10.2	Rannsóknir, fyrirbyggjandi gögn og viðmið.....	92
10.3	Grunnástand	93
10.4	Umhverfisáhrif.....	99
10.5	Niðurstaða umhverfismats.....	102
11	Loftslag.....	103
11.1	Matsspurningar	103
11.2	Rannsóknir, fyrirbyggjandi gögn og viðmið.....	103
11.3	Grunnástand	104
11.4	Umhverfisáhrif.....	104
11.5	Niðurstaða umhverfismats.....	106
12	Skipulag og landnotkun.....	107
12.1	Skipulagsmál.....	107
12.2	Verndarákvæði og takmörkun á landnotkun	111

12.3 Niðurstaða.....	113
13 Mótvægisaðgerðir og vöktunaráætlun	114
13.1 Mótvægisaðgerðir	114
13.2 Stýringar- og vöktunaráætlun	115
14 Heildaráhrif og niðurstaða.....	121
15 Leyfismál	122
16 Samráð og kynningar	123
16.1 Samráð við undirbúning verkefnisins	123
16.2 Kynning matsáætlunar.....	123
16.3 Áætlun um samráð og kynningu við gerð umhverfismatsskýrslu.....	123
17 Heimildir	125
18 Myndaskrá.....	127
19 Töfluskrá.....	131
20 Viðaukaskrá.....	132

Samantekt

Framkvæmdaáform Carbfix

Carbfix hf. áformar niðurdælingu á allt að 406 þúsund tonnum af koldíoxíði (CO₂) á ári í borholur til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði í Sveitarfélaginu Ölfusi. Í þessari umhverfismatsskýrslu er gerð grein fyrir mati á umhverfisáhrifum framkvæmdar og reksturs geymslusvæðis Carbfix á geymslugeyminn, grunnvatn, jarðskjálftavirkni og loftslag. Megin viðfangsefni skýrslunnar eru matsferlið, kynningar og samráð, markmið og forsendur framkvæmdar, helstu framkvæmdaþættir þess valkosta sem er metinn, upplýsingar um tengdar framkvæmdir, aðferðafræði og umhverfismat framkvæmdar, skipulag, landnotkun og leyfismál, ásamt mótvægisaðgerðum og vöktunaráætlun.

Gert er ráð fyrir að starfsemi Carbfix við Hellisheiðarvirkjun verði í Húsmúla, Jarðhitagarði Orku náttúrunnar, Sleggjubeinsdal, Þrengslum og við Gráuhnúka. Áform Carbfix á Hellisheiði eru þrenns konar:

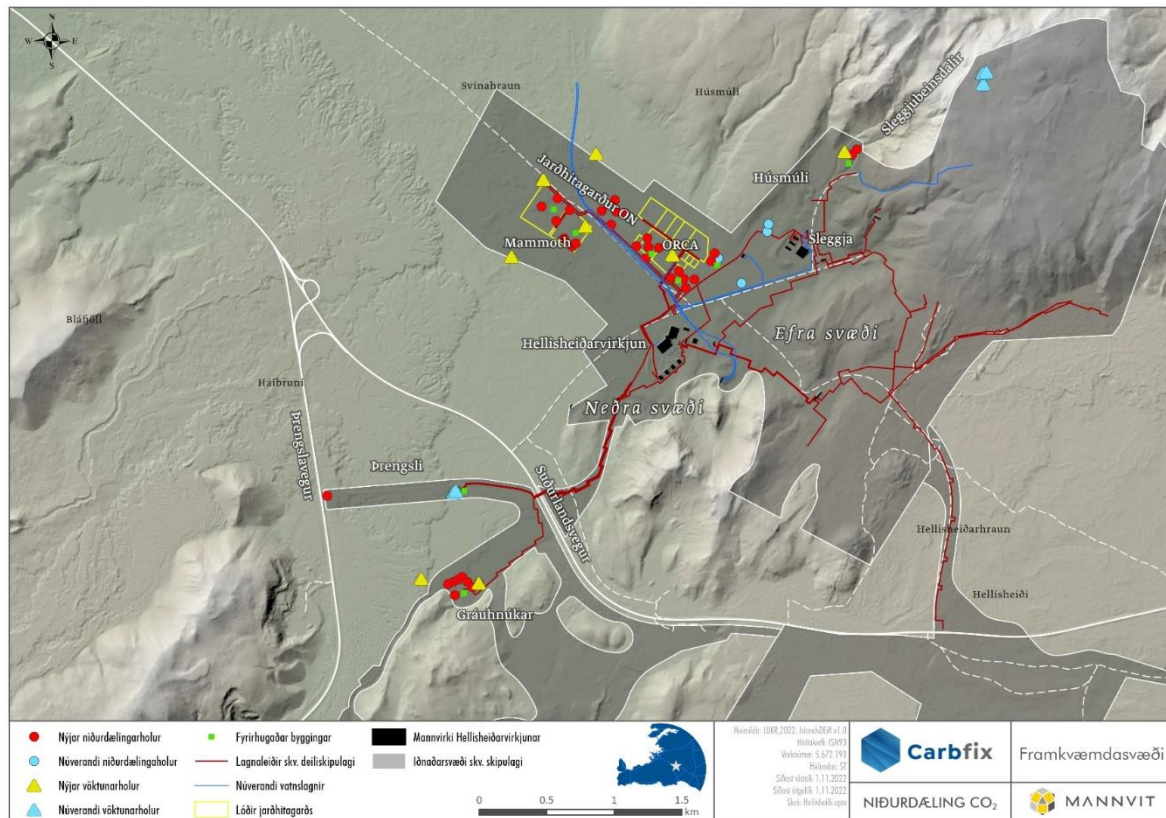
- Í fyrsta lagi verður allt að 47.000 tonnum CO₂ og allt að 11.000 tonnum brennisteinsvetni (H₂S), sem fangað verður í núverandi og nýrri hreinsistöð úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar, dælt niður í Húsmúla í djúpkerfi geymslusvæðisins.
- Í öðru lagi er gert ráð fyrir niðurdælingu á CO₂ úr andrúmslofti frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði í millikerfi geymslusvæðisins á allt að 44.000 tonnum á ári frá tveimur lofthreinsiverum Climeworks, Orca og Mammoth. Auk þess áforma Carbfix og ON að setja upp þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni fyrir niðurdælingu allt að 15.000 tona af CO₂ á ári.
- Í þriðja lagi er gert ráð fyrir niðurdælingu í nýjar holur í Jarðhitagarði, Húsmúla, Sleggjubeinsdal, Þrengslum eða við Gráuhnúka allt að 300.000 tona á ári af CO₂ í millikerfi, úr andrúmslofti frá nýjum aðilum, frá nýrri starfsemi á athafnasvæði ON eða CO₂ fluttu á staðinn.

Staðan í umhverfismati

Skrefin í umhverfismatsferlinu eru nokkur og mögulegt að koma athugasemdum á framfæri á mismunandi stigum í ferlinu. Fyrsta stigið, forsamráð við Skipulagsstofnun og leyfisveitendur og samkomulagi hlutaðeigandi aðila um tilhögun umhverfismatsins, fór fram í nóvember og desember árið 2021. Áður hafði framkvæmdin verið kynnt fyrir hagsmunaaðilum í tengslum við mótun löggjafar um geymslu CO₂ í jarðlögum.

Aðkoma umsagnaraðila og almennings á sér tvívegis stað eftir að opinbert matsferli hefst, fyrst vegna kynningar matsáætlunar og svo aftur þegar umhverfismatsskýrsla er kynnt. Matsáætlun Carbfix, var lögð fram í febrúar 2022. Skipulagsstofnun kynnti matsáætlunina og birti álit sitt í apríl 2022. Á kynningartímanum kynnti Carbfix matsáætlunina á opnum streymisfundi.

Carbfix og Mannvit leggja fram þessa umhverfismatsskýrslu, sem byggir á matsáætlun og álit Skipulagsstofnunar. Skipulagsstofnun kynnir skýrsluna og sendir til umsagnaraðila. Opinber kynningartími er sex vikur. Haldinn verður opinn kynningarfundur á vegum Carbfix 21. febrúar 2023 á kynningartíma Skipulagsstofnunar. Carbfix gerir einnig ráð fyrir kynna umhverfismatsskýrsluna á vef fyrirtækisins og miðla upplýsingum til leyfisveitenda og helstu hagaðila eftir því sem við. Að loknum kynningartíma fer fram úrvinnsla athugasemda við umhverfismatsskýrslu og vinna Skipulagsstofnunar við gerð álits um umhverfismat framkvæmdarinnar.



Markmið og forsendur framkvæmdar

Framkvæmdin verður á Hellisheiði þar sem allir innviðir, þekking og reynsla eru til staðar. Markmið framkvæmdarinnar er að auka umfang og tryggja framtíð niðurdælingar CO₂ í jarðlög til steinrenningar á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði. Framkvæmdin er forsenda þess að Hellisheiðarvirkjun geti verið sporlaus, með niðurdælingu CO₂ og H₂S úr útblæstri virkjunarinnar í djúperfi geymslusvæðisins. Einnig er hún forsenda reksturs lofthreinsivera Climeworks og þróunarmiðstöðvar í lofthreinsitækni, sem munu afhenda Carbfix CO₂ til niðurdælingar í millikerfi geymslusvæðisins. Framkvæmd Carbfix mun auk þess gera nýjum aðilum kleift að afhenda Carbfix CO₂ til niðurdælingar í millikerfi geymslusvæðisins.

Carbfix tæknin varð til sem rannsóknarverkefni árið 2007 í samstarfi Orkuveitu Reykjavíkur, Háskóla Íslands, Columbia University í New York og CNRS í Toulouse. Niðurdæling á CO₂ og H₂S frá hreinsistöð Hellisheiðarvirkjunar hefur átt sér stað í Húsmúla frá árinu 2012. Auk niðurdælingar frá hreinsistöð Hellisheiðarvirkjunar hefur Carbfix dælt niður CO₂ úr andrúmslofti, í samstarfi Climeworks frá 2017. Haustið 2021 var lofthreinsiverið Orca tekið í notkun og er CO₂ frá því dælt niður í Þrengslum.

Carbfix tæknin

Carbfix tæknin felst í svokallaðri steindabindingu þar sem CO₂ leystu í vatni er dælt niður í basaltbergglög um niðurdælingarholur. Þegar niðurdælingarvökvinn flæðir út í basaltberggrunninn leysast málmar á borð við kalsíum, magnesíum og járn úr basaltinu, sem ganga í efnasamband við CO₂ og falla út sem karbónatsteindir. Karbónatsteindirnar eru stöðugar í milljónir ára, en Carbfix hefur sýnt fram á að yfir 95% af niðurdældu CO₂ steinrennist á innan við tveimur árum.

Valkostur í umhverfismati

Staðsetning framkvæmdar Carbfix á Hellisheiði býður upp á aðstæður til að auka umsvif niðurdælingar CO₂ til geymslu í jarðlögum og stuðla að þróun loftslagslausna sem nýtast munu á heimsvísu. Carbfix telur að til að ná markmiðum framkvæmdarinnar á fullnægjandi hátt, auk þess að tryggja að hún sé framkvæmanleg og hagkvæm, sé ekki um aðra raunhæfa valkosti að ræða hvað varðar forsendur um niðurdælingu CO₂ og H₂S frá Hellisheiðarvirkjun og CO₂ frá nýju lofthreinsiveri, þróunarmiðstöð lofthreinsitækni og frá nýjum aðilum til framtíðar. Carbfix telur að nálægð við Hellisheiðarvirkjun, aðra tengda starfsemi, fyrirliggjandi innviði og áformaða uppbyggingu á þeim stað skipti miklu máli til að ná markmiðum framkvæmdar.

Í umhverfismatinu er aftur á móti greint frá mismunandi útfærslum framkvæmdarinnar og fleiri en einni staðsetningu, einkum með tilliti til borsvæða og dýpis niðurdælingarhola, þar sem dælt verður í djúpkerfi geymslusvæðisins annars vegar og millikerfi hins vegar. Umhverfisáhrif allra staðsetninga og útfærslna eru metin.

Framkvæmd Carbfix er niðurdæling CO₂ í borholur til geymslu í jarðlögum og felur í sér niðurdælingarholur, vöktunarholur, stjórnbyggingar, kúluhús og lagnir

Í þessu umhverfismati er gerð grein fyrir áhrifum niðurdælingar á 47.000 tonnum á ári CO₂ og 11.000 tonnum H₂S á ári frá hreinsistöðvum ON í fyrirliggjandi niðurdælingarholur ON í Húsmúla í djúpkerfi geymslusvæðisins á Hellisheiði. Einnig er gerð grein fyrir áhrifum niðurdælingar í millikerfi í borholur í Jarðhitagarði allt að 59.000 tonna CO₂ á ári, sem fangað verður úr andrúmslofti af lofthreinsiverum Climeworks og þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni. Jafnframt er gerð er grein fyrir áhrifum niðurdælingar í millikerfi allt að 300.000 tonna CO₂ á ári frá nýjum aðilum, sem fangað verður úr andrúmslofti, eða fangað frá nýrri starfsemi á á Hellisheiði eða flutt á staðinn, á borsvæðum í Jarðhitagarði, við Húsmúla, í Sleggjubeinsdal, Þrengslum eða við Gráuhnúka.

Gert er ráð fyrir að bora allt 22 nýjar niðurdælingarholur og allt að sjö nýjar vöktunarholur á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði. Einnig er gert ráð fyrir að reisa allt að fjórar nýjar stjórnbyggingar og allt að 22 ný kúluhús til að skýla niðurdælingarholum. Þá kemur til greina að reisa alls fimm skýli yfir vöktunarholur sem verða innan lóðamarka í Jarðhitagarði og á borsvæðum í Sleggjubeinsdal og við Gráuhnúka.

Gert er ráð fyrir að allar nýjar lagnir frá starfsemi föngunaraðila að niðurdælingarkerfi Carbfix, sem byrjar við rennismæli, nokkrum metrum frá holutoppum borhola, verði niðurgrafnar og lagðar í núverandi lagnabelti eins og þau eru skilgreind í deiliskipulagi.

Áætlað jarðrask er allt að 24.000 m² á framkvæmdatíma vegna nýrra bygginga og borstæða niðurdælingar- og vöktunarhola. Stærð borstæða verður takmörkuð eins og hægt er, þau löguð að landslagi og gengið frá framkvæmdasvæðinu þannig að mannvirki falli vel að umhverfi.

Í eftirfarandi töflu er gerð grein fyrir helstu kennistærðum fyrirhugaðrar framkvæmdar við niðurdælingu CO₂ til geymslu í jarðlögum á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði.

	Að hámarki	Skýring
Magn CO₂ í millikerfi	359.000 tonn/ári	Allt að 4.000 frá Orca, 40.000 frá Mammoth, 15.000 frá Þróunarmiðstöð um lofthreinsitækni og 300.000 frá nýjum aðilum.
Magn CO₂ í djúpkerfi	47.000 tonn/ári	Allt að 36.000 frá nýrri hreinsistöð ON og allt að 11.000 frá nýverandi hreinsistöð Hellisheiðarvirkjunar.
Magn H₂S í djúpkerfi	11.000 tonn/ári	Ný hreinsistöð hreinsar því sem næst allt H ₂ S úr vinnslurás Hellisheiðarvirkjunar.
Fjöldi nýrra niðurdælingarhola í millikerfi	22	Til greina kemur að öll niðurdæling í nýjar holur verði í Jarðhitagarði, en jafnframt að dreifa henni á borsvæði í Sleggjubeinsdal, Húsmúla, Þrengslum eða við Gráuhnúka auk Jarðhitagarðs.
Fjöldi nýrra vöktunarhola	7	Gefi niðurstöður eftirlits til kynna að fleiri vöktunarhola verði þörf kemur til greina að bora fleiri vöktunarholur.
Byggingarmagn	1.300 m ²	Gert er ráð fyrir allt að fjórum stjórnstöðvum 50-100 m ² og allt að 27 kúluhúsum 25-30 m ² að stærð. Til greina kemur að reisa allar byggingar innan Jarðhitagarðs eða að hluta þar og að hluta í Húsmúla, Sleggjubeinsdal, Þrengslum og við Gráuhnúka.
Áætlað rask	24.000 m ²	Vegna byggingarreita stjórnbygginga og borplana fyrir nýjar niðurdælingar- og vöktunarholur á óröskuðu svæði í Jarðhitagarði og utan núverandi borsvæða
Rafmagnsnotkun	~1-2 MW	Carbfix semur við ON um afhendingu á rafmagni.
Vatnsnotkun	250 L/s	Carbfix semur við ON um afhendingu á vatni.
Lagnir	110-220 m	Gert er ráð fyrir að lagnir liggi annað hvort alfarið innan lóðar samstarfsaðila, eða innan borsvæða Carbfix. Lagnir ná 5-10 m frá hverjum holutoppi að rennismæli.

Framkvæmdatími miðast við þrjá framkvæmdaáfanga

Gert er ráð fyrir að verkefnum Carbfix við niðurdælingu CO₂ á Hellisheiði verði skipt upp í þrjá framkvæmdaáfanga hvað varðar tímaröð og er gerð grein fyrir því hér að neðan. Carbfix vinnur að umsókn um starfsleyfi til geymslu CO₂ í jörðu í samræmi við gr. 33 c í lögum um hollustuhætti og mengunarvarnir nr. 7/1998 og 6. gr. reglugerðar nr. 1430/2022 um geymslu koldíoxíðs í jörðu fyrir fyrsta og annan áfanga samhliða vinnu við umhverfismat framkvæmdarinnar.

Fyrsti áfangi framkvæmdar Carbfix telur niðurdælingu allt að 44.000 tonna á ári af CO₂ í millikerfi í Jarðhitagarði og í Þrengslum frá Orca lofthreinsiveri Climeworks sem hóf starfsemi í rannsóknar- og þróunarskyni í september 2021 og Mammoth lofthreinsiveri Climeworks sem gert er ráð fyrir að verði komið í full afköst í lok árs 2024. Í fyrsta áfanga er einnig gert ráð fyrir gangsetningu þróunarmiðstöðvar fyrir lofthreinsitækni í Jarðhitagarði og niðurdælingu allt að 15.000 tonna af CO₂ á ári í millikerfi í Jarðhitagarði eða í Sleggjubeinsdal. Allt að fjórar vöktunarholur og tvær vöktunarholur verðar boraðar í fyrsta áfanga.

Í öðrum áfanga er gert ráð fyrir niðurdælingu á CO₂ og H₂S í djúpkerfi frá nýrri hreinsistöð ON við Hellisheiðarvirkjun og ráðgert að hún verði gangsett í árslok 2024. Að því loknu verður allt að 47.000 tonnum á ári af CO₂ og allt að 11.000 tonnum á ári af H₂S úr útblæstri virkjunarinnar dælt niður í djúpkerfi geymslusvæðis Carbfix. Niðurdæling í djúpkerfi og vöktun verður í sömu holur og verið hefur.

Í þriðja áfanga er gert ráð fyrir gangsetningu verkefna í áföngum frá og með árinu 2025 vegna niðurdælingar frá einum eða fleiri nýjum aðilum í millikerfi á geymslusvæði Carbfix. Gert er ráð fyrir fullum afköstum niðurdælingar, allt að 300.000 tonn af CO₂ á ári, kringum 2030. Allt að 18 nýjar niðurdælingarholur og sjö nýjar vöktunarholur verða boraðar í þriðja áfanga.

Tengdar framkvæmdir er á vegum og ábyrgð viðkomandi rekstraraðila

Niðurdæling Carbfix á CO₂ til geymslu í jarðlögum er ávallt í samstarfi við rekstraraðila sem sér um föngun og flytur það um lagnir að niðurdælingarholum Carbfix. Rekstraraðilinn er háður því að viðkomandi starfsemi hafi fylgt viðeigandi málsmeðferð hvað varðar umhverfismats-, skipulags- og leyfisferli. Eftirfarandi eru helstu framkvæmdir á Hellisheiði sem tengjast framkvæmd Carbfix.

Orka náttúrunnar hefur rekið hreinsistöð fyrir hreinsun CO₂ og H₂S úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar frá 2014 og áformar að reisa nýja hreinsistöð. Í fullum rekstri verður um 95% af CO₂ og nær allt H₂S fangað úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar.

Svissneska tæknifyrirtækið **Climeworks** starfrækir nýtt loftheinsiver, Orca, sem fangar allt að 4.000 tonn af CO₂ á ári úr andrúmslofti, en hyggur auk þess á föngun á allt að 40.000 tonnum CO₂ árlega úr andrúmslofti í Mammoth loftheinsiverinu í Jarðhitagarði, sem áætlað er að hefji starfsemi í ársbyrjun 2024.

Áformuð er **þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni** í tæknigörðum ON eða í Jarðhitagarði á Hellisheiði þar sem þriðju aðilar munu geta prófað tæknilausnir til að fanga á CO₂ úr andrúmslofti.

Carbfix gerir ráð fyrir að geta tekið við allt að 300.000 tonnum á ári af CO₂ frá **nýjum aðilum** til niðurdælingar á geymslusvæðinu á Hellisheiði. Niðurdæling getur verið á lóð viðkomandi eða á borsvæðum Carbfix í Jarðhitagarði, Húsmúla, Sleggjubæsdal, Þrengslum eða við Gráuhnúka.

Carbfix ráðgerir að semja við **Orku náttúrunnar** um afhendingu á rafmagni og vatni til niðurdælingar. Orkuþörf er í kringum 1-2 MW og vatnsþörf er áætluð allt að 250 L/s af vatni fyrir öll niðurdælingarverkefni Carbfix.

Umhverfimat framkvæmdar

Aðferðafræði við mat á umhverfisáhrifum byggir meðal annars á leiðbeiningum Skipulagsstofnunar um flokkun umhverfisþátta, viðmið, einkenni og vægi umhverfisáhrifa.

Áhrifasvæði á yfirborði vegna niðurdælingar CO₂ á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði er um 4 km². Bein áhrif verða á svæði sem fer undir byggingar, borholur, lagnir fyrir rafmagn, gas og vatn og önnur mannvirki. Áhrifasvæði niðurdælingar CO₂ til geymslu í jarðlögum mun ná yfir stærra svæði undir yfirborði og var áætlað um 42 km² í matsáætlun. Áhrifa á jarðskjálftavirkni tengt niðurdælingu getur mögulega gætt í talsverðri fjarlægð frá upptökum skjálfta. Athugunarsvæði umhverfismats vegna mats á áhrifum niðurdælingar og geymslu CO₂ í jarðlögum miðast annars vegar áhrif á yfirborði og hins vegar áhrif undir yfirborði.

Ekki er talið að framkvæmdin hafi áhrif á gróður, fugla, jarðmyndanir, landslag, ásynd, fornleifar, hljóðvist, samfélag og landnotkun. Í samræmi við matsáætlun er fjallað um mat á áhrifum á **geymslugueyminn, grunnvatn, jarðskjálftavirkni og loftslag.**

Áhrif á geymslugueyminn

Mat á áhrifum niðurdælingar CO₂ og H₂S í djúpkerfi og niðurdælingar CO₂ í millikerfi til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði á geymslugueyminn byggir á sérfræðiskýrslum ÍSOR og Carbfix um grunnástand geymslusvæðisins og forðafræðilíkanerð, ásamt mati á breytingum á geymslugueyminum sem kunna að fylgja niðurdælingu CO₂. Forðafræðilíkan var notað til að herma flæði á CO₂ hlöðnu í vatni um geymslugueyminn og spá fyrir um áhrif niðurdælingar miðað við að engin steinrenning CO₂ eigi sér stað. Þannig fæst mat á mestu mögulegu dreifingu CO₂ um jarðlögin og hámarksáhrif niðurdælingar CO₂. Niðurdæling á CO₂ á Hellisheiði verður annars vegar í geymslugueymi í svokallað millikerfi og hins vegar í geymslugueymi í djúpkerfi.

Hvað er átt við með millikerfi og djúpkerfi geymslusvæðis Carbfix?

Niðurdæling Carbfix á Hellisheiði miðar í öllum tilvikum að því að dæla í millikerfið, ef frá er skilin niðurdæling á jarðhitagasi, CO₂ og H₂S, úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar. Millikerfið sem er aðskilið frá efsta grunnvatnskerfinu á Hellisheiði með þéttara móbergslagi, er á um 300 til 700-1000 m dýpi og er farið að gæta jarðhitaáhrifa á þessu dýpi. Neðri mörk millikerfisins markast af háhitakerfinu sjálfu en skilgreind mörk millikerfis og djúpkerfis miðast við lágviðnámskápu sem umlykur háviðnámskjarna við kortlagningu háhitakerfisins. Djúpkerfi geymslusvæðis Carbfix er neðan þessarar lágviðnámskápu. Öllum jarðhitavökva frá Hellisheiðarvirkjun er dælt niður í djúpkerfið í 1800-2500 m djúpar niðurdælingarholur. Carbfix hefur dælt niður CO₂ ásamt H₂S í tvær þeirra frá árinu 2014.

Áhrif niðurdælingar á CO₂ og H₂S úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar í djúpkerfi

Gert er ráð fyrir að Carbfix dæli niður í djúpkerfi í Húsmúla allt að 47.000 tonn CO₂ á ári og allt að 11.000 tonn H₂S á ár úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar frá núverandi og nýrri hreinsistöð ON. Gasið verður leyst í þétti- og skiljuvatni sem nú þegar er dælt í niðurdælingarholur ON. Forðafraeðilíkan fyrir þrjár sviðsmyndir miðað við hvaða niðurdælingarholur ON yrðu notaðar, sýna að eftir niðurdælingu CO₂ í 30 ár er CO₂ aflokað í djúpkerfinu og leysnibindingu er viðhaldið. Sömu sögu er að segja um H₂S. Ekkert CO₂ mun berast í grunnvatn ofan 100 m.u.s.

Áhrif niðurdælingar allt að 47.000 tonna af CO₂ á ári úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar í djúpkerfi geymslusvæðis á Hellisheiði á geymslugeymi millikerfis og djúpkerfis eru metin **óveruleg**.

Áhrif niðurdælingar á CO₂ úr andrúmslofti frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði í millikerfi

Carbfix gerir ráð fyrir niðurdælingu í millikerfi í Jarðhitagarði á allt að 59.000 tonnum af CO₂ úr andrúmslofti árlega frá Orca og Mammoth lofthreinsiverum Climeworks og þróunarmiðstöð í lofthreinsitækni. Forðafraeðilíkan sem nýtt var til að spá fyrir um dreifingu á CO₂ hlöðnu vatni frá niðurdælingu allt að 359.000 tonna á ári í 30 ár í millikerfi, eða 300.000 tonnum meira árlega en Carbfix gerir ráð fyrir að dæla niður frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði, sýnir að CO₂ dreifist ekki til brunnsvæðis vatnsbólsins í Engidal og að leysnibindingu verður alltaf viðhaldið í geymslugeyminum. Því er ekki búist við að CO₂ uppleyst í vatni eða á gasformi geti streymt út fyrir millikerfið og upp til yfirborðs. Skoðaðar voru þrjár meginsviðsmyndir miðað við mismunandi borsvæði, en allar sviðsmyndir sýna að tryggt verður að geymsla CO₂ takmarkist við millikerfið og að CO₂ berist því hvorki í grunnvatnskerfið né í djúpkerfi. Þá eru litlar líkur taldar á að hita- og þrýstingsbreytingar hafi áhrif á vatns- eða jarðhitavinnslu. Með niðurdælingu CO₂ í niður í millikerfi til geymslu í jarðlögum verður dregið úr styrk gróðurhúsalofttegunda í andrúmslofti og komið í veg fyrir neikvæð áhrif á loftslag.

Áhrif niðurdælingar í millikerfi allt að 59.000 tonna CO₂ sem fangað verður úr andrúmslofti árlega á Hellisheiði í 30 ár á geymslugeymi millikerfis og djúpkerfis er metin **óveruleg**.

Áhrif niðurdælingar á CO₂ úr andrúmslofti frá nýjum aðilum í millikerfi.

Áform Carbfix gera ráð fyrir niðurdælingu á allt að 300.000 tonnum af CO₂ á ári úr andrúmslofti frá nýjum aðilum eða frá nýrri starfsemi á, eða flutt á staðinn til niðurdælingar í millikerfi. Dælt verður niður í nýjar holur á borsvæðum í geymslusvæðisins á Hellisheiði. Hér að framan kemur fram að forðafraeðilíkan var nýtt til að spá fyrir um dreifingu CO₂ miðað við hámarksniðurdælingu í 30 ár í millikerfi á geymslusvæði Carbfix, eða allt að 359.000 tonn/ári. Það samsvarar öllu CO₂ frá lofthreinsiverum sem verður dælt niður í Jarðhitagarði ásamt CO₂ frá nýjum aðilum sem áætlað er að dæla niður í millikerfi geymslusvæðisins. Niðurstaða um umhverfismat þessara verkefna er

hin saman. Með niðurdælingu CO₂ í niður í millikerfi til geymslu í jarðlögum verður dregið úr styrk gróðurhúsalofttegunda í andrúmslofti og komið í veg fyrir neikvæð áhrif á loftslag.

Áhrif niðurdælingar Carbfix á allt að 300.000 tonnum CO₂ á Hellisheiði árlega frá nýjum aðilum í millikerfi í 30 ár á Hellisheiði á geymslugeymi millikerfis og djúpkerfis eru metin **óveruleg**.

Áhrif á grunnvatn

Mat á áhrifum niðurdælingar og geymslu CO₂ í djúpkerfi og millikerfi geymslusvæðis Carbfix á Hellisheiði á grunnvatn byggir á sérfræðiskýrslum Orkuveitu Reykjavíkur um grunnvatnslög ofan hins eiginlega jarðhitakerfis. Jafnframt byggir það á skýrslu sérfræðinga Carbfix um grunnástand geymslusvæðisins, forðafræðilíkangerð fyrir niðurdælingu CO₂ í millikerfi og djúpkerfi, ásamt hugsanlegum breytingum sem fylgja framkvæmdinni.

Áhrif framkvæmdar við niðurdælingu CO₂ til geymslu í jörðu á Hellisheiði á grunnvatn á framkvæmdatíma eru metin **óveruleg**. Óhapp hefði tímabundin og staðbundin áhrif á grunnvatn en með búnaði og viðbragðsaðgerðum er komið í veg fyrir að þau verði alvarleg.

Niðurdæling á CO₂ leystu í vatni úr lofthreinsiveri Mammoth gæti haft tímabundin og staðbundin neikvæð áhrif á styrk járn, ammóníum og heildarmagns lífræns kolefnis í grunnvatni í millikerfinu. Einnig er möguleiki á tímabundnum og staðbundnum neikvæðum áhrifum á styrk efna eins og kalsíum, magnesíum, járn, snefilefna og þungmálma í grunnvatni millikerfis og djúpkerfis næst niðurdælingarholum. Fyrirhugað er að nýta vatn frá kæliturnum Hellisheiðarvirkjunar, sem nú er fargað um grunnar svelgholur í nágrenni virkjunarinnar, til niðurdælingar í 300-800 m djúpar holur í millikerfi geymslusvæðis Carbfix. Sú breyting að minnka losun kælivatns í efstu grunnvatnslög hefur staðbundið talsvert jákvæð áhrif á grunnvatn. Niðurstöður reikninga í forðafræðilíkani eru að niðurdælt CO₂ muni ekki berast í efra grunnvatnskerfi eða vatnsból eftir 30 ára hámarksniðurdælingu, þ.e. 47.000 tonn á ári í djúpkerfi og 359.000 tonn á ári í millikerfi á geymslusvæði Carbfix.

Áhrif niðurdælingar CO₂ á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði, á grunnvatn og vatnsból á rekstrartíma eru metin **óveruleg**.

Áhrif á jarðskjálftavirkni

Mat á áhrifum niðurdælingar CO₂ í millikerfi og djúpkerfi geymslusvæðis Carbfix á Hellisheiði á jarðskjálftavirkni og mat á jarðskjálftahættu byggir á sérfræðiskýrslu Íslenskra orkurannsókna (ÍSOR). Möguleg náttúruvá á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði tengist fyrst og fremst jarðskjálftum.

Á framkvæmdatíma er búist við **óverulegum** áhrifum á jarðskjálftavirkni á geymslusvæði Carbfix. Talið er að hætta sé á finnanlegri jarðskjálftavirkni á rekstrartíma vegna niðurdælingar CO₂ í djúpkerfi í Húsmúla. Áhrif niðurdælingar CO₂ í djúpkerfi á jarðskjálftavirkni eftir skilgreindar mótvægisáðgerðir eru metin óveruleg. Hætta á finnanlegri jarðskjálftavirkni á rekstrartíma er talin óveruleg vegna niðurdælingar CO₂ í millikerfi, á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði. Áhrif niðurdælingar CO₂ á rekstrartíma á jarðskjálftavirkni, hvort heldur er í djúpkerfi og millikerfi, eru metin **óveruleg**.

Áhrif á loftslag

Markmið framkvæmdar Carbfix er að auka umfang og tryggja framtíð niðurdælingar CO₂ til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði. Með Carbfix tækninni umbreytist niðurdælt CO₂ leyst í vatni í steindir og binst varanlega djúpt í jarðlögum. Ef öll fyrirhuguð áform Carbfix eru tekin saman, verður

allt að 406.000 tonnum CO₂ á ári dælt niður til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði. Það mun draga úr losun gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloft á landsvísu auk þess sem CO₂ verður hreinsað úr randrúmslofti í lofthreinsiverum. Verkefni Carbfix styður við loftslagsmarkmið íslenskra stjórnvalda og alþjóðleg markmið og alþjóðasamninga. Áhrif niðurdælingar á CO₂ á Hellisheiði á loftslag, eru metin **verulega jákvæð**.

Mótvægisáðgerðir, stýring og vöktun

Mótvægisáðgerðir eða áherslur til þess að koma í veg fyrir eða draga úr áhrifum á hvern og einn umhverfisþátt eru sett fram í þeim tilgangi að halda umhverfisáhrifum í lágmarki. Carbfix mun taka mið af reglum Orkustofnunar nr. OS-2016-R01-01, um viðbúnað og viðbrögð við jarðskjálftavá vegna losunar vökva djúpkerti. Þá verður niðurdæling CO₂ í millikerfi í jarðhitagarði og öðrum fyrirhuguðum borsvæðum á geymslusvæðinu á Hellisheiði aukin í skrefum og fylgst vel með jarðskjálftavirkni.

Ítarlegar stýringar- og vöktunaráætlanir, sem verða uppfærðar reglulega, liggja fyrir vegna niðurdælingar CO₂ á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði. Tilgangurinn er að tryggja öruggan og skilvirkan rekstur allra kerfa, gera grein fyrir magni niðurdælds CO₂ og vakta afdrif þess í geymslugeyminum. Þættirnir sem verða vaktar eru: Geymslugeymir, grunnvatn, yfirborð geymslusvæðis, jarðskjálftavirkni og niðurdælingarkerfi.

Skipulag og landnotkun

Framkvæmdin fellur vel stefnu aðalskipulags Ölfuss og er í samræmi við skilmála landnotkunar á skilgreindu iðnaðarsvæði, I21, um hreinlega starfsemi sem ekki valdi mengun og nýti afurðir Hellisheiðarvirkjunar. Einnig fylgir hún viðmiðum um hreinsun brennisteinsvetnis. Þá er I20 skilgreint sem iðnaðarsvæði og niðurrennsliðssvæði, en ekki er sérstaklega gerð grein fyrir starfsemi Carbfix á svæðinu að öðru leyti. Fyrirhuguð framkvæmd fellur sérstaklega vel að stefnu aðalskipulags um iðnaðarsvæði.

Gert er ráð fyrir að fyrirhuguð framkvæmd verði í samræmi við gildandi deiliskipulag fyrir Hellisheiðarvirkjun. Haft verður samráð við Sveitarfélagið Ölfus um þörf fyrir breytingu á deiliskipulagi eftir því sem við á.

Orðskýringar

Borsvæði	Skilgreind svæði á yfirborði þar sem niðurdælingarholur verða staðsettar.
Framkvæmdaraðili	Aðili, sem hyggst hefja framkvæmd, sem lög um umhverfismat framkvæmda og áætlana ná til.
Föngun	Ferli þar sem koldíoxíð er fjarlæggt úr gasstraumi þar sem það er til staðar, annað hvort úr útblæstri eða úr andrúmslofti, til nýtingar, geymslu eða förgunar.
Förgun	Ferli þar sem koldíoxíð er varanlega bundið og getur ekki lekið aftur út í andrúmsloftið. Dæmi um þetta ferli er steinrenning þar sem koldíoxíð er varanlega bundið í steindum.
Gasbóluprýstingur	Mældur prýstingur þar sem fyrsta gasbóla myndast við prýstiléttingu á gashlöðnu vatni (e. bubble point pressure).
Geymslugeymir	Jarðlög neðanjarðar þar sem geymsla koldíoxíðs á sér stað auk sprunga og lekastrúktúra sem geta haft áhrif á öryggi og áreiðanleika geymslu koldíoxíðs á svæðinu.
Geymslugeta	Magn CO ₂ sem fræðilega væri hægt að binda í jarðlögum.
Geymslusvæði	Svæði sem afmarkast á yfirborði af geymslugeymi auk tilheyrandi búnaðar fyrir niðurdælingu og geymslu koldíoxíðs, hvort sem hann er ofan jarðar eða neðan jarðar.
Grunnvatn	Vatn sem fyllir sprungur og holrými í berggrunni.
Hreinsistöð	Stöð sem hreinsar koldíoxíð úr gasstraumi til niðurdælingar. Hreinsi-stöðin getur í sumum tilvikum einnig hreinsað aðrar gastegundir, líkt og hreinsistöðin við Helligshéiðarvirkjun sem hreinsar einnig brennisteinsvetni til niðurdælingar.
Hárpípubinding	Annað stig bindingar CO ₂ þegar því er dælt í setlög. Við niðurdælingu á CO ₂ í ópétt og porlött setlög soga hárpípukraftar vatn inn í hluta holrýmanna með tímanum og einangrar CO ₂ og eykur þannig öryggi bindingarinnar enn frekar.
Jarðhitakerfi	Afmarkað rúmmál í jarðskorpu þar sem hræring grunnvatns á sér stað og varmi er fluttur með vatni úr neðri hluta skorpunnar upp undir yfirborð. Það inniheldur alla þætti kerfisins, þ.e. aðrennsli, uppstreymisrás, lauga- og hverasvæði og afrennsli.
Djúpkerfi	Hér notað um heitan og vatnsgæfan hluta jarðhitakerfis, sem hægt er að nýta til orkuvinnslu. Djúpkerfið hýsir háhitakerfið og

	<p>er oft skilgreint sem háviðnámskjarni sem er umlukinn lágviðnámskápu í viðnáms-mælingum. Þessar breytingar á viðnámi í berginu tengjast ummyndun bergsins og þróun ummyndunarsteinda úr lághitasteindum sem myndast við 50-200°C, í háhitasteindir sem myndast við yfir 200°C.</p>
Lekt	Sá eiginleiki efnis eða hlutar að hleypa í gegn vatni.
Leysnibinding	Þegar CO ₂ er leyst í vatni í geymslugeyminum. Þannig er CO ₂ bundið í einum fasa og því enginn uppdrifskraftur sem drífur það til yfirborðs. Öryggi bindingarinnar eykst þannig enn frekar. Leysnibinding á sér stað við eða fyrir niðurdælingu með Carbfix aðferðinni en er þriðja stig bindingar á CO ₂ þegar því er dælt í setlög.
Lofthreinsiver	Kerfi sem samanstendur af loftsugum sem eru nýttar til að fanga koldíoxíð úr andrúmslofti.
Loftsugur	Tækni sem þróuð er til að fanga koldíoxíð beint úr andrúmslofti.
Matsáætlun	Áætlun framkvæmdaraðila um á hvaða þætti framkvæmdar og umhverfis leggja skuli áherslu í frummatsskýrslu og um kynningu og samráð.
Millikerfi	Hér notað um grunnvatnskerfi sem liggur neðan kalda grunnvatnsins, frá um 300 m og niður á um 700 m dýpi þar sem mörk háhitakerfisins liggja. Í þessu vatnskerfi gætir jarðhitaáhrifa og er hiti frá um 50°C til yfir 200°C.
Mótvægisaðgerðir	Aðgerðir til að koma í veg fyrir, draga úr eða bæta fyrir neikvæð umhverfisáhrif.
Niðurdæling	Dæling vökva og/eða koldíoxíðs djúpt í jarðlög um niðurdælingarholur.
Niðurdælingarkerfi	Kerfi sem stýrir flæði vökva og/eða koldíoxíðs við dælingu djúpt í jarðlög um niðurdælingarholur. Kerfið er staðsett við holutopp niðurdælingarholu og nær niður í holuna.
Steinrenning	Að herma náttúruleg ferli við niðurdælingu þannig að styrkur gastegunda sem dælt er niður og efnasamsetning berglaga sem dælt er í verði til þess að koldíoxíð geti myndað steindir djúpt í berg-grunninum með því að bindast málum sem fyrir eru í berginu.
Steindabinding	Þegar málmar leysast úr berginu og bindast CO ₂ og mynda steindir. Þannig steinrennur CO ₂ . Þetta er öruggasta geymsluform CO ₂ enda steindir stöðugar í berggrunninum í

milljónir ára. Þetta er annað stig bindingar við niðurdælingu CO₂ með Carbfix aðferðinni en fjórða og takmarkaðasta stig niðurdælingar á CO₂ þegar því er dælt í setlög.

Stemmingsbinding

Fyrsta stig bindingar á CO₂ þegar því er dælt í setlög þar sem þétt jarðlag (þakberg) kemur í veg fyrir að hreint CO₂, sem er eðlisléttara en umhverfið, rísi upp úr setlagi til yfirborðs.

Umhverfismatsskýrsla

Skýrsla framkvæmdaraðila um mat á umhverfisáhrifum sem Skipulagsstofnun auglýsir til kynningar.

1 Inngangur

Carbfix hf. áformar niðurdælingu á allt að 406 þúsund tonnum af koldíoxíði á ári í borholur til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði í Sveitarfélaginu Ölfusi. Framkvæmdin fellur í flokk A samkvæmt tl. 3.18 geymslusvæði fyrir koltvísýring (CO₂) í jörðu í 1 viðauka við lög nr. 111/2021 um umhverfismat framkvæmda og áætlana. Hún er því matsskyld framkvæmd. Í þessari umhverfismatsskýrslu er gerð grein fyrir umhverfisáhrifum fyrirhugaðrar framkvæmdar og reksturs geymslusvæðis Carbfix á helstu umhverfisþætti, þ.e. geymslugeyminn, grunnvatn, jarðskjálftavirkni og loftslag.

1.1 Forsaga

Niðurdæling á koldíoxíði (CO₂) og brennisteinsvetni (H₂S) til geymslu í jarðlögum hefur átt sér stað á vinnslusvæði Hellisheiðarvirkjunar undir merkjum Carbfix frá árinu 2012. Þann 1. nóvember 2022 hafði um 85.000 tonnum af CO₂ og um 47.000 tonnum af H₂S frá hreinsistöð Hellisheiðarvirkjunar verið dælt niður í djúpar niðurdælingarholur frá árinu 2014. Þar hvarfast gastegundirnar, sem eiga uppruna sinn í jarðhitakerfinu, við berggrunninn, mynda steindir og eru þannig varanlega bundnar á föstu formi.

Þann 11. mars 2021 voru samþykkt á Alþingi lög um breytingu á lögum um hollustuhætti og mengunarvarnir, lögum um umhverfismat og lögum um loftslagsmál (niðurdæling koldíoxíðs). Lög þessi fela í sér innleiðingu á ákvæðum tilskipunar Evrópuþingsins og ráðsins 2009/31/EB um geymslu CO₂ í jörðu. Með innleiðingu laganna er niðurdæling á CO₂ til geymslu í jarðlögum heimiluð að undangengnu umhverfismati. Lögin taka ekki til verkefna í rannsóknar-, þróunar- eða prófunarskyni ef um er að ræða verkefni sem snúa að geymslu á minna en 100.000 tonnum af CO₂.

Þegar framangreind lög tóku gildi hafði um 66.000 tonnum af CO₂ og um 36.000 tonnum af H₂S verið dælt niður frá hreinsistöð Hellisheiðarvirkjunar frá árinu 2014. Auk þess voru framkvæmdir hafnar við lofthreinsiver svissneska nýsköpunarfyrirtækisins Climeworks sem kallast Orca og er staðsett í Jarðhitagarði Orku Náttúrunnar (ON) á Hellisheiði, en afköst þess eru um 4.000 tonn af CO₂ á ári. Orca hóf formlegan rekstur í september 2021 og er því CO₂ sem fangað er dælt niður á geymslusvæði Carbfix í Þrengslum.

1.2 Stutt um áform Carbfix

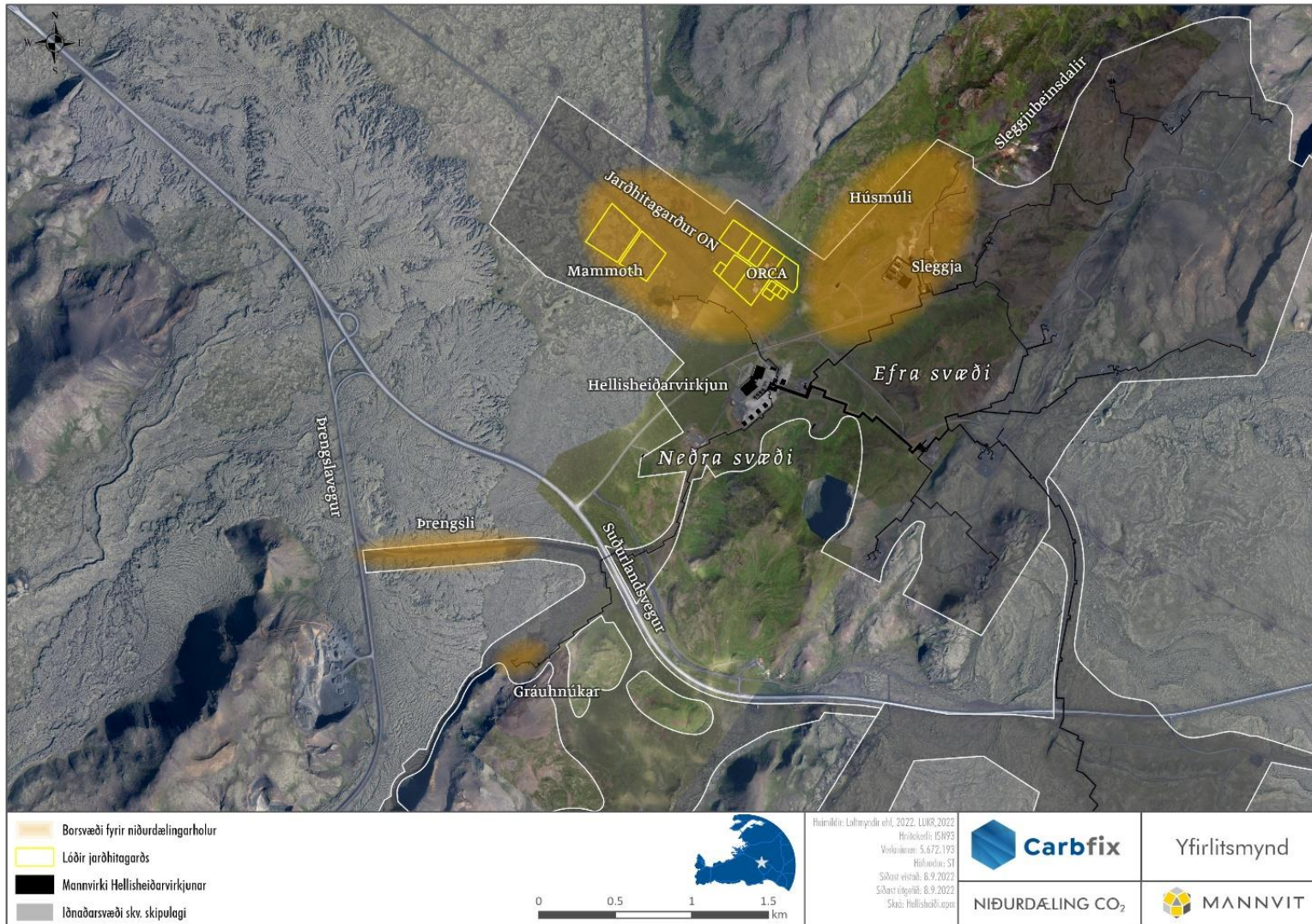
Áætlað er að fræðilega væri hægt að steinrenna á bilinu 840 – 15.800 milljónir tonna af CO₂ á áhrifasvæði niðurdælingar út frá því svæði sem gert er ráð fyrir að sækja um starfsleyfi fyrir¹. Áætlað hefur verið að um 1.650 milljónir tonna af CO₂ séu nú þegar náttúrulega steinrunnin í jarðlögum innan vinnslusvæðis Hellisheiðarvirkjunar á Hellisheiði vegna samspils CO₂, basalts og vatns.² Carbfix áætlað að dæla niður CO₂ á skilgreindu svæði innan vinnslusvæðisins. Á **mynd 1.1** má sjá hvar starfsemi Carbfix við Hellisheiðarvirkjun er fyrirhuguð, það er í Húsmúla, Jarðhitagarði Orku náttúrunnar, Sleggjubeinsdal, Þrengslum og við Gráuhnúka. Áform Carbfix á Hellisheiði eru þrenns konar:

¹ Ratoius og Vilante, 2022.

² Wiese o.fl., 2008.

- 1. Niðurdæling á CO₂ og H₂S úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar í djúpkerfi:** Niðurdæling frá núverandi hreinsistöð hefur verið starfrækt frá árinu 2014 og hafði um 85.000 tonnum af CO₂ og um 47.000 tonnum af H₂S verið dælt niður þann 1. nóvember sl. í djúpar niðurdælingarholur á skilgreindu niðurdælingarsvæði virkjunarinnar við Húsmúla. Auk niðurdælingar frá núverandi hreinsistöð stendur til að reisa nýja hreinsistöð Hellisheiðarvirkjunar sem eykur afköst úr um 12.000 tonnum af CO₂ á ári í allt að 47.000 tonn CO₂ á ári, og úr um 5.000 tonnum af H₂S á ári í allt að 11.000 tonn H₂S á ári sem dælt verður niður á sama stað. Ný hreinsistöð er hluti af svokölluðu Silfurbergs verkefni sem hefur að markmiði að fanga nær allt koldíoxíð og brennisteinsvetni úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar. Silfurberg hefur hlotið styrk frá Nýsköpunarsjóði Evrópusambandsins (Innovation Fund), fyrst íslenskra verkefna.
- 2. Niðurdæling á CO₂ úr andrúmslofti frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði í millikerfi.** Niðurdæling frá lofthreinsiverinu Orca sem Climeworks rekur í Jarðhitagarði hefur verið starfrækt frá því í september 2021. Orca getur fangað allt að 4.000 tonn af CO₂ á ári sem dælt er í niðurdælingarholu í Þrengslum. Undirbúningur er einnig hafinn fyrir byggingu lofthreinsiversins Mammoth sem Climeworks áætla að setja í rekstur árið 2024, en afköst þess eru allt að 40.000 tonn af CO₂ á ári. Auk lofthreinsivera Climeworks áætla Carbfix og ON að setja upp þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni þar sem allt að 15.000 tonnum af CO₂ á ári verður dælt niður. Gert er ráð fyrir að niðurdæling frá Mammoth fari fram í Jarðhitagarði og að niðurdæling frá þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni fari fram í Jarðhitagarði eða í Sleggjubeinsdal. Á mynd 1.1 má sjá hvar lóðir Mammoth og Orca eru staðsettar.
- 3. Niðurdæling á CO₂ úr andrúmslofti frá nýjum aðilum í millikerfi; frá nýrri starfsemi á athafnasvæði ON eða flutt á staðinn til niðurdælingar.** Carbfix gerir ráð fyrir að geta tekið við allt að 300.000 tonnum á ári af CO₂ til niðurdælingar frá nýjum aðilum. Þetta gætu verið lofthreinsiver eða önnur iðnaðarver nýrra viðskiptavina eða CO₂ sem fangað væri annars staðar og flutt á svæðið til förgunar. Dælt verður í nýjar grynri (<1000 m) niðurdælingarholur í Jarðhitagarði ON og á skilgreindum borsvæðum í Húsmúla, í Sleggjubeinsdal, Þrengslum eða Gráuhnúkum.

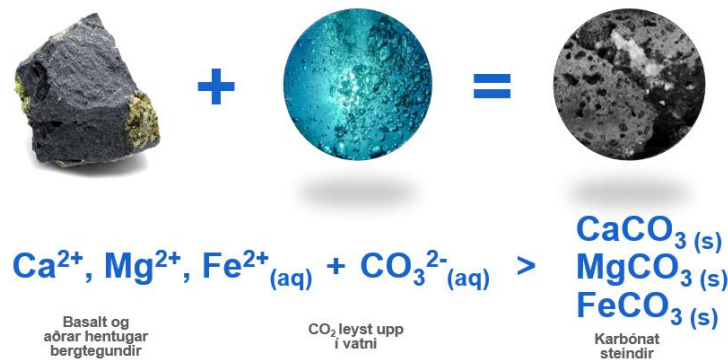
Í kafla 5 hér á eftir eru ítarlegri lýsingar á núverandi verkefnum og framangreindum áformum Carbfix.



Mynd 1.1: Fyrirhuguð borsvæði fyrir geymslu CO₂ á geymslusvæði Carbfix við Helliðheiðarvirkjun.

1.3 Carbfix tæknin

Carbfix tæknin felst í svokallaðri steindabindingu (e. mineral trapping) þar sem CO₂ leystu í vatni er dælt niður í basaltbergglög um niðurdælingarholur. Basalt er afar hvarfgjarnt og inniheldur málma sem bindast CO₂ í jarðlögum og myndar steindir. Þar að auki er basalt sérlega gropið og lekt og býr því yfir miklu rými til geymslu á steinrunnu CO₂. Þegar CO₂ sem leyst hefur verið í vatni flæðir út í basaltberggrunninn leysir það málma á borð við kalsíum, magnesíum og járn úr basaltinu. Þessir málmar ganga í efnasamband við CO₂ og falla út sem karbónatsteindir sem fylla upp í holrými og sprungur í basaltinu (**myndir 1.2 og 1.3**). Snefilefni og þungmálmar leysast einnig úr basaltinu í upphafi steinrenningar ferlisins. Mjög lítið er þó af þessum efnum í íslensku bergi, auk þess þau eru mun torleystari kalsíum, magnesíum og járn karbónatsteindum falla fyrr út úr lausninni. Því er lítil hættu talin á mengun grunnvatns hvað varðar þessi efni. Karbónatsteindir eru stöðugar í milljónir ára, en Carbfix hefur sýnt fram á að yfir 95% af CO₂ sem dælt er niður steinrennist á innan við tveimur árum, sem er mun skemmri tími en áður var talið. Carbfix tæknin er afar örugg: Vatn með leystu CO₂ sem dælt er niður í geymslugeyminn er eðlisþyngra en vatnið sem fyrir er í berglögnum og leitar því niður fremur en aftur upp til yfirborðs. Auk þess er basalt gjarnan sprungið og gropið og seytlar vatn því auðveldlega um jarðlögin. Geymsla CO₂ með Carbfix tækninni er ein öruggasta geymsla á CO₂ sem völ er á þar sem steinrunnið CO₂ er stöðugt í berggrunninum og engin hættu á að gasið leki upp á yfirborðið.



Mynd 1.2: Skýring á efnafræðilegum ferlum Carbfix tækninnar.



Mynd 1.3: Steindabinding CO₂ í basaltberggrunni. Til vinstri á mynd má sjá ferskt basalt sem ekki hefur hvarfast við CO₂. Til hægri má sjá basalt sem hvarfast hefur við CO₂. Líkt og sjá má hafa hvítar karbónatsteindir fyllt upp í holurými í berginu.

1.4 Núverandi staða umhverfismats

Matsáætlun Carbfix, sem er fyrsta skrefið í ferli umhverfismatsframkvæmda, var lögð fram 17. febrúar 2022. Skipulagsstofnun kynnti framkvæmdina og matsáætlunina með auglýsingu í Fréttablaðinu, Morgunblaðinu og á vefsíðu stofnunarinnar 22. febrúar. Þá hélt Carbfix kynningarfund í opnu streymi 10. mars 2022 um fyrirhugaða framkvæmd og matsáætlun fyrir hana. Skrefin í umhverfismatsferlinu eru nokkur og mögulegt að koma athugasemdum á framfæri strax á því stigi, en einnig síðar í ferlinu. Frestur til að skila umsögnum um matsáætlun var til 22. mars 2022. Carbfix sendi Skipulagsstofnun viðbrögð sín við þeim umsögnum sem bárust. Þann 27. apríl 2022 birti stofnunin álit sitt um matsáætlunina.³

1.5 Framsetning og umsjón með umhverfismatsskýrslu

Hér er lögð fram umhverfismatsskýrsla, sem byggir á matsáætlun og álitum Skipulagsstofnunar dags. 27. apríl 2022. Í kafla 2 er fjallað nánar um ferli umhverfismats.

Umhverfismatsskýrslan fjallar um eftirfarandi megin viðfangsefni, sem eru:

- Umhverfismat framkvæmda og matsferlið
- Markmið og forsendur framkvæmdar vegna geymslu CO₂ í jarðlögum
- Valkostur sem ætlunin er að meta
- Helstu framkvæmdaþættir og einkenni þeirra
- Upplýsingar um tengdar framkvæmdir
- Aðferðafræði við umhverfismat
- Umhverfismat framkvæmdar
- Skipulag, landnotkun og leyfismál
- Mótægisaðgerðir og vöktunaráætlun

³ <https://www.skipulag.is/umhverfismat-framkvaemda/gagnagrunnur-umhverfismats/matsaaetlanir/nr/1226#emat>

Carbfix er framkvæmdaraðili, eigandi og rekstraraðili fyrirhugaðrar niðurdælingar CO₂ til geymslu í jarðlögum á geymslusvæði á Hellisheiði. Carbfix ber ábyrgð á umhverfismatinu en fól Mannviti að hafa umsjón með umhverfismati framkvæmdarinnar.

Carbfix og Mannvit leggja fram þessa umhverfismatsskýrslu, sem byggir að stórum hluta á fyrirliggjandi gögnum auk rannsókna utanaðkomandi sérfræðinga á viðkomandi umhverfisþáttum. Sérfræðingarnir hafa lesið yfir viðkomandi kafla í umhverfismatsskýrslu og farið yfir vægiseinkunnir umhverfisáhrifa sem þar koma fram. Í **töflu 1.1** er yfirlit yfir þau er komu að gerð umhverfismatsskýrslu niðurdælingar CO₂ á Hellisheiði. Í **töflu 1.2** er yfirlit yfir sérfræðiskýrslur sem unnar voru fyrir matið ásamt höfundum þeirra. Sérfræðiskýrslur má finna í viðaukum með þessari umhverfismatsskýrslu og er þeirra getið í viðaukaskrá. Aðrir sérfræðingar og starfsfólk Carbfix og Mannvits hafa auk þess komið að verkefninu eftir því sem við á.

Tafla 1.1: Þátttakendur í umhverfismati niðurdælingar CO₂ á geymslusvæði Hellisheiði.

Aðili	Hlutverk	Fyrirtæki
Auður Andrésdóttir	Verkefnisstjóri umhverfismats og ritstjóri skýrslna	Mannvit
Heiða Aðalsteinsdóttir	Verkefnisstjóri	Carbfix
Bergur Sigfússon	Tæknilegur ráðgjafi	Carbfix
Matt Villante	Tæknilegur ráðgjafi	Carbfix
Martin Voigt	Tæknilegur ráðgjafi	Carbfix
Sandra Ósk Snæbjörnsdóttir	Tæknilegur ráðgjafi	Carbfix
Thomas Ratouis	Tæknilegur ráðgjafi	Carbfix
Bergrós Arna Sævarsdóttir	Umhverfismat og skýrsluskrif	Mannvit
Þór Tómasson	Tæknilegur ráðgjafi	Mannvit
Steinþór Traustason	Kortagerð og myndvinnsla	Mannvit

Tafla 1.2 Sérfræðiskýrslur og höfundar þeirra.

Höfundar	Sérfræðiskýrsla	Fyrirtæki
Thomas Ratouis, Matt Villante	Model of the injection of CO ₂ at Hellisheiði. Possible effects of the proposed CO ₂ injection and mineral storage operations.	Carbfix
Sigrún Tómasdóttir	Grunnvatn á Hellisheiði. Grunnástand og möguleg áhrif fyrirhugaðrar framkvæmdar Carbfix um geymslu CO ₂ í jarðlögum á Hellisheiði.	Orkuveita Reykjavíkur
Egill Árni Guðnason, Þorbjörg Ágústsdóttir, Sveinborg Hlíf Gunnarsdóttir, Iwona Monika Galeczka, Auður Agla Óladóttir, Ásdís Benediktsdóttir og Gunnlaugur M. Einarsson	Sérfræðiskýrsla fyrir umhverfismat fyrir niðurdælingu CO ₂ á Hellisheiði. Grunnástand og hugsanlegar breytingar.	Íslenskar orkurannsóknir
Martin Voigt	Hellisheiði CO ₂ niðurdæling vöktunaráætlun.	Carbfix

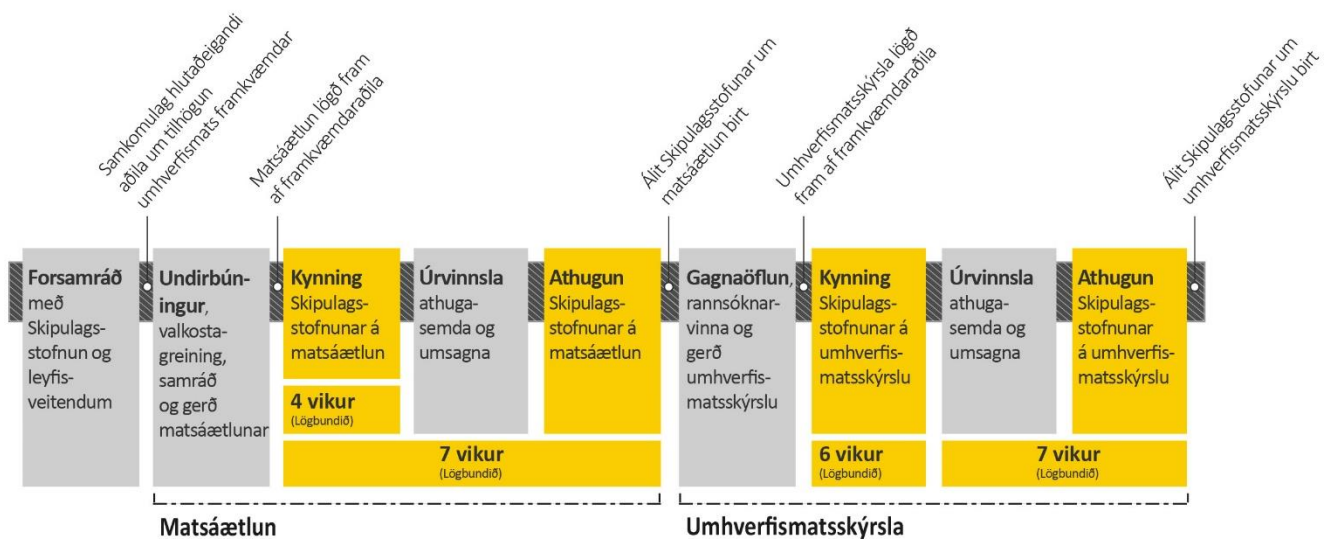
2 Umhverfismat framkvæmda - matsferlið

2.1 Markmið umhverfismats og málsmeðferð

Samkvæmt 1. gr. laga nr. 111/2021 er markmið umhverfismats framkvæmda og áætlana:

- sjálfbær þróun, heilnæmt umhverfi og umhverfisvernd sem vinna skal að með umhverfismati framkvæmda og áætlana sem eru líklegar til að hafa umtalsverð umhverfisáhrif,
- skilvirkni við umhverfismat framkvæmda og áætlana,
- að almenningur hafi aðkomu að umhverfismati framkvæmda og áætlana og samvinna aðila sem hafa hagsmuna að gæta eða láta sig málið varða vegna umhverfismats framkvæmda og áætlana.

Vinna umhverfismatsins er í samræmi við það sem kveðið er á um í lögum um umhverfismat. Málsmeðferðin er stigskipt, sjá **mynd 2.1**, þar sem lagaleg skylda er að tryggja aðkomu opinberra aðila, hagsmunaaðila og almennings. Aðkoma umsagnaraðila og almennings á sér stað tvívegis, fyrst í 4 vikur vegna kynningar matsáætlunar og svo aftur í 6 vikur á kynningartíma Skipulagsstofnunar þegar umhverfismatsskýrsla er auglýst og kynnt. Að auki getur Skipulagsstofnun staðið að forsamráði með framkvæmdaaðila og leyfisveitendum eftir því sem á við. Carbfix átti samráð við hagsmunaaðila við gerð matsáætlunar og hefur átt samráð í undirbúningi þessarar umhverfismatsskýrslu og mun halda því áfram eftir því sem verkefninu vindur fram. Fjallað er um samráð og kynningar í kafla 16.



Mynd 2.1: Ferli umhverfismats framkvæmdar.

2.2 Tímaáætlun og aðkoma almennings að mati á umhverfisáhrifum

Með kynningu á matsáætlun er kallað eftir ábendingum um hvað fjalla skuli um í umhverfismati verkefnisins. Einnig er óskað eftir upplýsingum og ábendingum um framkvæmdasvæðið sjálft til þess að undirbyggja betur umfjöllun um möguleg áhrif á umhverfi og samfélag. Umsagnafrestur er fjórar vikur á þessu stigi og allar umsagnir skulu sendar til Skipulagsstofnunar. Vísað er í **mynd 2.1** hér að framan til nánari skýringar á matsferlinu og aðkomu umsagnaraðila og almennings.

Álit Skipulagsstofnunar um matsáætlun lá fyrir 27. apríl 2022. Í framhaldinu var unnið að umhverfismati og umhverfismatsskýrslu. Gert er ráð fyrir kynningu á umhverfismatsskýrslunni 2 febrúar til 17. mars 2023. Áætlað er að álit Skipulagsstofnunar á umhverfismatsskýrslu liggi fyrir

á öðrum ársfjórðungi 2023. Nánari upplýsingar um tímaáætlun matsferlisins, verkþætti þess og áfanga má sjá í **töflu 2.1**.

Tafla 2.1: Tímaáætlun umhverfismatsvinnu.

Verkliður	Tímaáætlun
Kynning verkefnis/forsamráð	Nóvember 2021 – janúar 2022
Matsáætlun lögð fram	Febrúar 2022
Frestur almennings og umsagnaraðila til athugasemda	Mars 2022
Álit Skipulagsstofnunar um matsáætlun	Apríl 2022
Umhverfismatsskýrsla til Skipulagsstofnunar	Nóvember 2022
Frestur almennings og umsagnaraðila til athugasemda	Febrúar – mars 2023
Álit Skipulagsstofnunar um umhverfismatsskýrslu	Maí 2023

2.3 Forsamráð

Samkvæmt 8. gr. laga um umhverfismat getur Skipulagsstofnun, framkvæmdaraðili eða leyfisveitandi haft frumkvæði að forsamráði um fyrirbyggjandi lögbundið ferli umhverfismats, skipulags og leyfisveitinga, til að unnt sé að hefja framkvæmdina. Markmið forsamráðs er að stuðla að samræmdu og skilvirku ferli og að greiða fyrir miðlun upplýsinga á milli framkvæmdaraðila, stjórnvalda og almennings, auk þess að stuðla að gæðum rannsókna og gagna. Við forsamráð skal taka afstöðu til þess hvort sameina skuli skýrslugerð og/eða kynningu umhverfismats framkvæmdar, skipulagsáætlunar, áætlunar samkvæmt öðrum lögum og/eða leyfisumsókna.

Carbfix kynnti á fundi hjá Skipulagsstofnun 4. nóvember 2021 fyrirhugaða framkvæmd, áherslur í umhverfismati, tímaáætlun umhverfismats-, skipulags- og leyfisumsókna, auk áforma um kynningu verkefnisins og samráð við leyfisveitendur. Einnig var farið yfir mögulega samþættingu skýrslugerðar vegna umhverfismats og umsóknar um starfs- og rekstrarleyfi.

Skipulagsstofnun boðaði síðar forsamráðsfund sem haldinn var 16. desember 2021. Á þann fund mættu fulltrúar Skipulagsstofnunar, umhverfis- og auðlindaráðuneytis, Umhverfisstofnunar, Sveitarfélagsins Ölfuss, Carbfix og Mannvits, sbr. fundargerð Skipulagsstofnunar.⁴ Carbfix kynnti fyrirhugaða framkvæmd, auk þess sem kallað var eftir ábendingum frá leyfisveitendum. Farið var yfir aðkomu þeirra að verkefninu, tímaferli umhverfismats og álits Skipulagsstofnunar, mögulegar skipulagsbreytingar og afgreiðsluferli Umhverfisstofnunar og samþættingu skýrslugerðar vegna umhverfismats og starfsleyfisumsóknar.

2.4 Matsáætlunarstig

2.4.1 Matsáætlun

Á þessu stigi er unnið að undirbúningi umhverfismatsins og lögð fram áætlun um hvernig unnið verði að matinu. Matsáætlun lauk með áliti Skipulagsstofnunar 27. apríl 2022. Matsáætlun er fyrsta skjal sem er útgefið í matsferlinu. Í matsáætlun er greint frá hvaða valkosti framkvæmdarinnar Carbfix leggur fram í vinnu umhverfismatsins. Þá er greint frá með hvaða hætti verður lagt mat á umhverfisáhrif framkvæmdarinnar. Það felur í sér að segja frá hvaða þætti í umhverfinu á að meta,

⁴ <https://www.skipulag.is/media/attachments/Fundargerð-Carbfix-nidurdaeling.pdf>

hvaða gögn og rannsóknir á að nota, hvernig matið á áhrifunum verður unnið og á hvaða viðmiðum það byggist.

Í kafla 16 er fjallað um kynningu verkefnisins og samráð við hagsmunaaðila.

Skipulagsstofnun kynnti matsáætlun á vef sínum 22. febrúar til 22. mars 2022. Auk þess sendi Skipulagsstofnun matsáætlunina til umsagnaraðila og óskaði eftir ábendingum og athugasemdum. Carbfix kynnti matsáætlunina einnig á vef sínum og á opnum streymisfundi 10. mars 2022. Alls bárust sjö umsagnir um matsáætlunina.

2.4.2 Álit Skipulagsstofnunar um matsáætlun

Innan sjö vikna frá því kynning hefst skal Skipulagsstofnun gefa álit sitt um matsáætlun með eða án athugasemda. Framkvæmdaraðili skal leggja álitid til grundvallar við umhverfismat framkvæmdarinnar. Geri Skipulagsstofnun athugasemdir í niðurstöðu sinni verða þær hluti af matsáætlun og ber Carbfix að vinna umhverfismatið í samræmi við þær.

Carbfix sendi Skipulagsstofnun viðbrögð sín við umsögnum sem bárust á tímabilinu 14. mars til 7. apríl 2022. Skipulagsstofnun birti álit sitt um matsáætlun með fimm athugasemdum 27. apríl 2022.

2.4.3 Frávik frá samþykktu matsáætlun

Samkvæmt matsáætlun var gert ráð fyrir að bora rannsóknarholu í Jarðhitagarði ON sem hluta af rannsóknnum á grunnástandi jarðlaga á fyrirhuguðu framkvæmdasvæði tengt umhverfismati framkvæmdarinnar. Markmið rannsóknarborunar var að afla frekari upplýsinga um eðliseiginleika geymslugueymisins á þessu svæði. Rannsóknaholan verður ekki boruð og er þetta frávik frá matsáætlun útskýrt hér á eftir.

Eftir að matsáætlun lá fyrir var vinnunni við umhverfismatið haldið áfram, s.s. við gerð jarðfræðilíkans af svæðinu. Í þeirri vinnu kom í ljós að rannsóknarborun væri ekki nauðsynleg fyrir fullnægjandi líkangerð sem lýsir grunnástandi geymslugueymis og mögulegum áhrifum framkvæmdarinnar á hann. Þrátt fyrir að undirbúningur borunar væri hafinn og framkvæmdaleyfi sveitarfélagsins Ölfuss lægi fyrir var ákveðið að leggja frekar aukna áherslu á söfnun og túlkun fyrirbyggjandi gagna sem nýtast í líkangerð og hermireikninga. Talið var að líkangerðin gæti skilað sambærilegum árangri. Á sama tíma upplýsti borverktakinn að seinkun yrði á verkinu miðað við tímalínu umhverfismatsins.

Fyrirliggjandi gögn voru í framhaldinu nýtt í umfangsmeiri líkanreikninga en gert var ráð fyrir og til að bæta fyrirbyggjandi jarðfræðilíkan af svæðinu. Við boranir á háhitaholum og niðurdælingarholum á Helligshéið hefur verið safnað ítarlegum gögnum úr holum á bortíma og í kjölfar borunar. Á grundvelli greininga liggja fyrir jarðlagagreiningar úr öllum holum sem hafa verið boraðar og sem dæmi eru tiltæk gögn um jarðlagaskipan og ummyndun á 300-800 m dýpi (millikerfi) til staðar frá fimm niðurdælingarholum á athugunarsvæði sérfræðiverkefna. Þá hafa jarðlög einnig verið greind í flestum grunnvatns- og eftirlitsholum. Auk þess liggja fyrir hitamælingar og ádælingarpróf sem gefa mikilvægar upplýsingar um eðli og umfang lektar á svæðinu. Einnig liggja fyrir jarðeðlisfræðilegar mælingar eins og viðnáms- og jarðskjálftamælingar á fyrirhuguðu geymslusvæði.

Við líkanreikninga kom í ljós að upplýsingar frá nálægum holum, m.a. niðurdælingarholu HN-11 sem er stefnuboruð í átt að Jarðhitagarði gefa góða mynd af þeim aðstæðum sem sem rannsóknarborunin átti að geta. Má í því sambandi nefna að einungis 1200 metrar skilja að holu HN-11 og fyrirhugaða niðurdælingarholu Carbfix vestast í Jarðhitagarði, á því dýpi sem millikerfið er.

Carbfix telur að rannsóknarhola í Jarðhitagarði hefði ekki bætt nauðsynlegum upplýsingum við fyrirliggjandi gögn til meta áhrif niðurdælingar CO₂ á geymslugeymi í millikerfi á Hellisheiði. Niðurstaðan er að með tilliti til eðliseinkenna jarð- og berglaga eru fyrirliggjandi gögn og túlkun þeirra talin bæði nægilega áreiðanleg og nógu nálægt mögulegu áhrifasvæði til að byggja á þeim líkangerð, hermireikninga og umhverfismatið.

2.5 Mat á umhverfisáhrifum

2.5.1 Rannsóknir og matsvinna

Carbfix ræður sérfræðinga til að vinna athuganir og rannsóknir, eftir því sem við á, á grunnástandi umhverfis og samfélags og gera grein fyrir þeim áhrifum sem framkvæmdin kann að hafa á viðkomandi þátt. Nánar er greint frá rannsóknum og umhverfismatsvinnu í 8. til 11. kafla.

2.5.2 Umhverfismatsskýrsla

Carbfix og Mannvit hafa byggt þessa umhverfismatsskýrslu á forskrift matsáætlunar, fyrirliggjandi gögnum og upplýsingum um grunnástand auk rannsóknum sérfræðinga sem birtar eru í sérfræðiskýrslum í viðaukum. Í skýrslunni er gerð grein fyrir umhverfisáhrifum af mismunandi útfærslum á þeim valkosti sem metinn er, þar sem unnið er með niðurstöður sérfræðiskýrslna, ítarleg fyrirliggjandi gögn og upplýsingar um grunnástand. Þá er greint frá mögulegum mótvægisáðgerðum. Umhverfismatsskýrslan er kynnt opinberlega í sex vikur, þar sem Skipulagsstofnun kallar eftir umsögnum fagaðila. Almennigur getur einnig veitt umsagnir.

Carbfix mun vinna úr innsendum umsögnum sem berast við umhverfismatsskýrsluna og sendir viðbrögð til Skipulagsstofnunar áður en stofnunin leggur fram álit.

2.5.3 Álit Skipulagsstofnunar um umhverfismat framkvæmdar

Skipulagsstofnun veitir rökstutt álit sitt um umhverfismat framkvæmdarinnar innan sjö vikna frá því kynningartíma lýkur. Carbfix sendir viðbrögð sín við umsögnum til Skipulagsstofnunar á þessu tímabili. Álit Skipulagsstofnunar skal lagt til grundvallar þegar leyfisveitendur afgreiða umsóknir um leyfi til framkvæmda.

3 Markmið og forsendur

3.1 Tilgangur og markmið framkvæmdar

Markmið framkvæmdarinnar er að auka umfang og tryggja framtíð niðurdælingar CO₂ til steinrenningar á Hellisheiði. Framkvæmdin er forsenda þess að Hellisheiðarvirkjun geti verið sporlaus, hvað CO₂ og H₂S varðar, árið 2025 með niðurdælingu á allt að 47.000 tonnum á ári af CO₂ og 11.000 tonnum á ári af H₂S úr útblæstri virkjunarinnar í djúpkerfi geymslusvæðisins. Einnig er hún forsenda þess að rekstur lofthreinsiversins Orca sem fangar allt að 4.000 tonn af CO₂ á ári geti haldið áfram og að Mammoth lofthreinsiver Climeworks, sem mun afhenda Carbfix allt að 40.000 tonn af CO₂ á ári til niðurdælingar í millikerfi geymslusvæðisins, geti tekið til starfa árið 2024. Samanlagt er áætlað að þessi verkefni muni dæla niður allt að 91.000 tonnum af CO₂ á ári til steinrenningar CO₂ frá árinu 2025.

Framkvæmd Carbfix mun auk þess gera nýjum aðilum kleift að dæla niður í millikerfi allt að 300.000 tonnum af CO₂ á ári til steinrenningar á skilgreindu geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði. Framkvæmdinni er valinn staður á Hellisheiði þar sem allir innviðir, þekking og reynsla eru til staðar til að auka umsvif kolefnisförgunar með sem skjótustum hætti og flýta þannig fyrir þróun loftslagslausna sem hægt verður að nota á heimsvísu.

3.2 Bakgrunnur niðurdælingar á Hellisheiði

Carbfix varð til sem rannsóknarverkefni árið 2007 í samstarfi Orkuveitu Reykjavíkur, Háskóla Íslands, Columbia University í New York og CNRS í Toulouse með það að markmiði að þróa náttúrulega lausn til að farga CO₂ með því að steinrenna það djúpt í jarðlögum.

Carbfix tæknin hefur verið þróuð á Hellisheiði. Tilraunaniðurdæling á 175 tonnum af CO₂ hófst snemma árs 2012 á borsvæði í Þrengslum og var þar sýnt fram á hraðari steinrenningu en áður hafði verið talið mögulegt, en yfir 95% af CO₂ hafði steinrunnið innan tveggja ára.⁵ Í kjölfarið var ráðist í tilraunaniðurdælingu á blöndu CO₂ og H₂S þar sem sýnt var fram á enn hraðari steinrenningu H₂S, eða á aðeins örfáum mánuðum.⁶ Þær niðurstöður voru grundvöllur að því að reisa varanlega hreinsistöð við Hellisheiðarvirkjun með það að markmiði að minnka losun bæði CO₂ og H₂S frá virkjuninni.

Niðurdæling frá hreinsistöð ON við Hellisheiðarvirkjun í djúpa niðurdælingarholu á niðurdælingarsvæði við Húsmúla hófst árið 2014 og var þá um 4.000 tonnum af CO₂ dælt niður á ári og um 2.500 tonnum af H₂S. Niðurdæling frá Hellisheiðarvirkjun hefur verið aukin í skrefum frá 2014 og nemur nú um 12.000 tonnum af CO₂ á ári og um 5.000 tonnum af H₂S, eða um 33% af CO₂ og um 75% af H₂S sem virkjunin losar.⁷

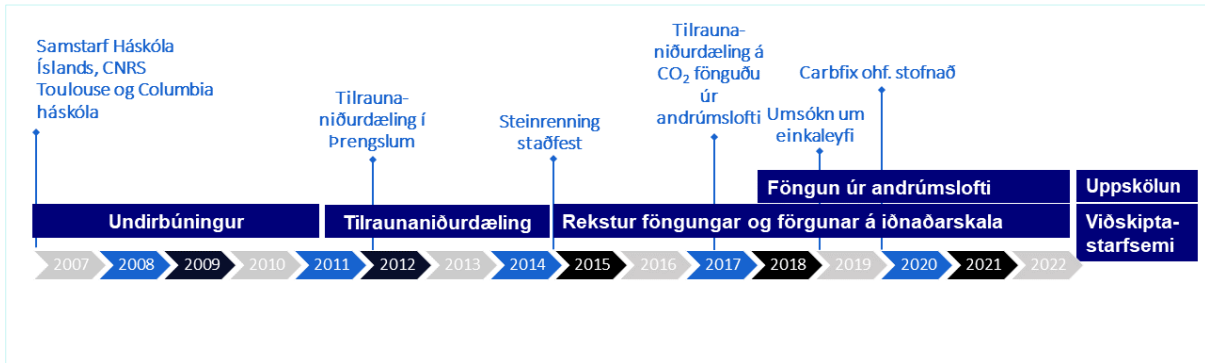
Auk niðurdælingar frá Hellisheiðarvirkjun í niðurdælingarholur við Húsmúla hefur Carbfix dælt niður CO₂ sem fangað hefur verið úr andrúmslofti í samstarfi við svissneska nýsköpunarfyriretakið Climeworks. Árið 2017 hófst tilraunaniðurdæling á allt að 50 tonnum af CO₂ sem fangað var úr andrúmslofti og dælt í niðurdælingarholur við Húsmúla. Haustið 2021 var lofthreinsiver Climeworks, Orca, tekið í notkun. Afkastageta lofthreinsiversins nemur um 4.000 tonnum af CO₂ á ári og er dælt í grunna niðurdælingarholu í Þrengslum, þar sem tilraunaniðurdælingar Carbfix fóru

⁵ Matter o.fl., 2016.

⁶ Snæbjörnsdóttir o.fl., 2017.

⁷ Sigfússon o.fl., 2018.

fram á árunum 2012-2013. **Mynd 3.1** sýnir tímalínu helstu verkefna Carbfix sem tengjast niðurdælingu CO₂ á Hellisheiði.

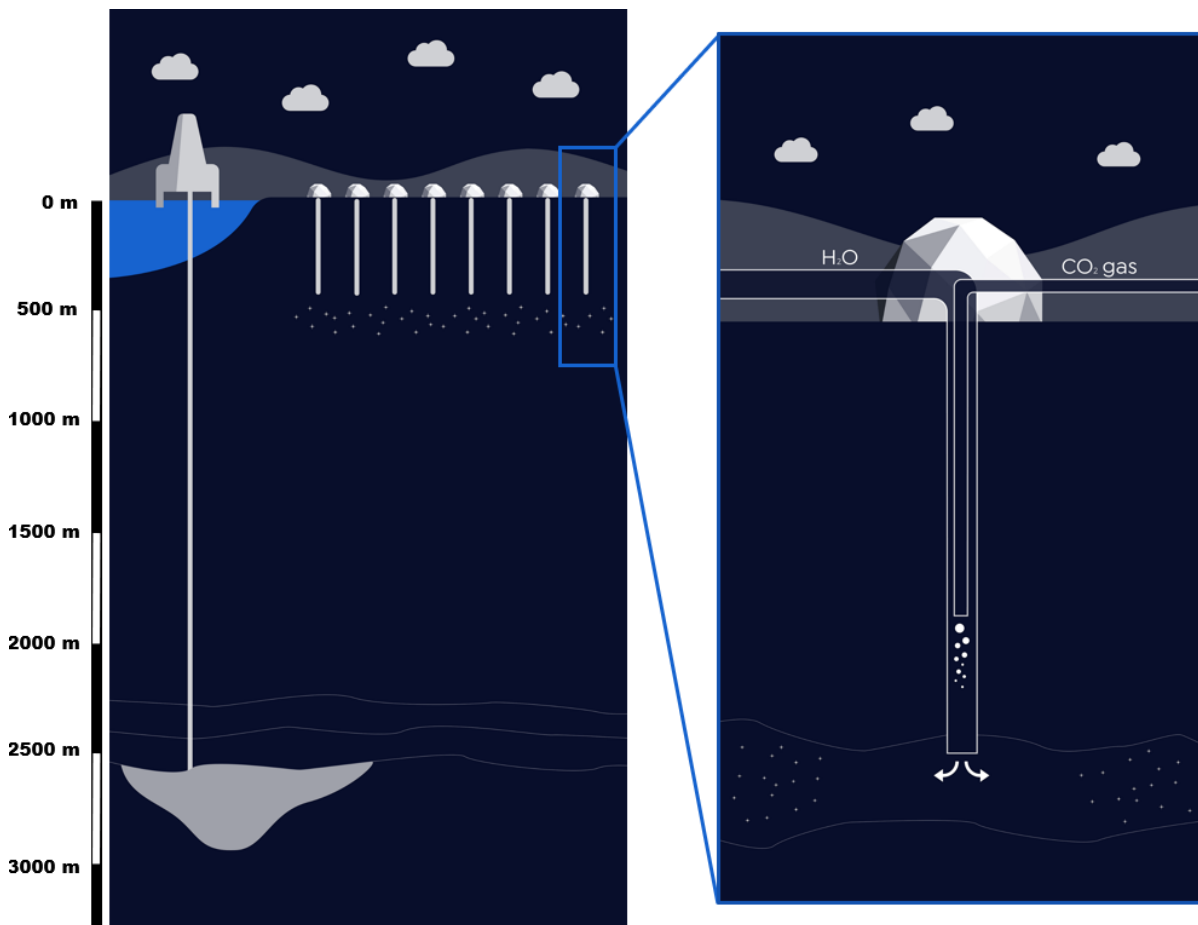


Mynd 3.1: Tímalína niðurdælingar CO₂ á Hellisheiði.

3.3 Niðurdæling CO₂ til geymslu í jarðlögum

Í megindráttum er í heiminum í dag notast við tvær aðferðir við niðurdælingu á CO₂ til geymslu í jarðlögum (**mynd 3.2**):

1. niðurdælingu á hreinu CO₂ til geymslu í setlögum
2. niðurdælingu á CO₂ leystu í vatni til steinrenningar, Carbfix tækninni, sem fjallað er um hér.



Mynd 3.2: Aðferðir til niðurdælingar á CO₂ til geymslu í jarðlögum: T.v. niðurdæling á hreinu CO₂ í setlög. T.h. niðurdæling á CO₂ leystu í vatni til steinrenningar í jarðlögum.

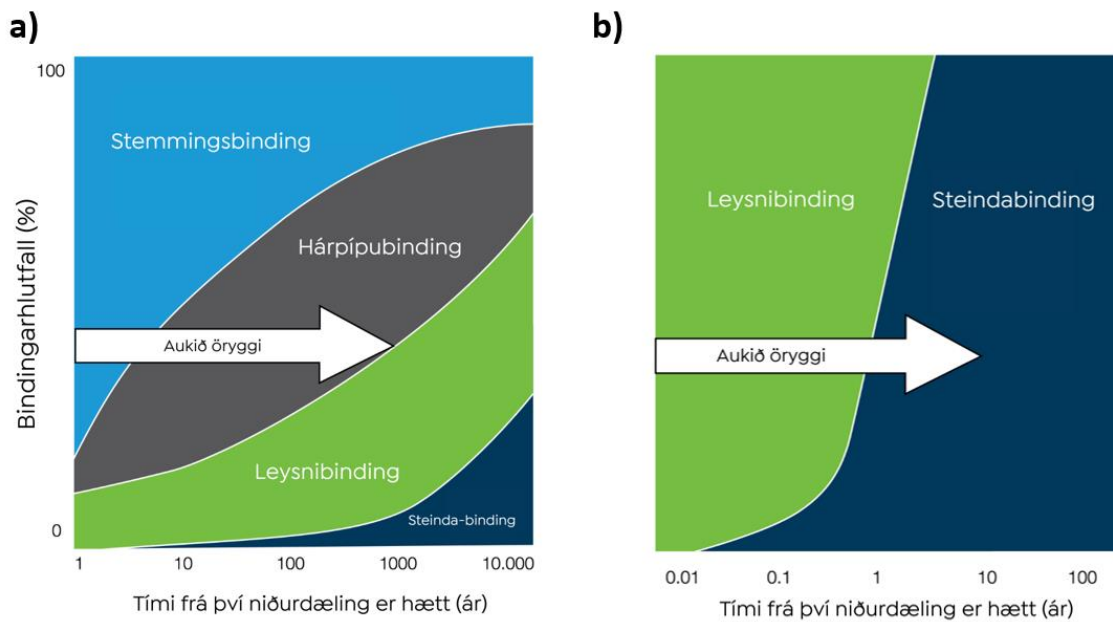
Niðurdæling á hreinu CO₂ í vökva-, gas- eða yfirkítiskum fasa hefur verið stunduð m.a. í tengslum við olíu- og gasvinnslu allt frá sjöunda áratug síðustu aldar. Dælt er í jarðlög við olíu- og gaslindir, kolalög eða jarðsjó í setlögum, þ.e. holrými neðanjarðar sem henta til geymslu á CO₂.

Fyrir niðurdælingu á hreinu CO₂ eru fjögur ferli sem binda CO₂ og breytist vægi hvers þeirra með tíma, og öryggi bindingarinnar sömuleiðis, líkt og sýnt er á mynd 3.3a. Ferlin fjögur eru:

- 1) **Stemmingsbinding** (*e. structural trapping*): Áður en niðurdæling hefst er tryggt að þétt jarðlag, svokallað þakberg, loki af geymslugeyminn og komi í veg fyrir að CO₂, sem er eðlisléttara en vatnið sem fyrir er í mynduninni, risi aftur til yfirborðs.
- 2) **Hárpípubinding** (*e. capillary trapping*): Með tíma sogar hárpípukraftur vatn inn í hluta holrýmanna og einangrar CO₂ og eykur þannig öryggi bindingarinnar enn frekar.
- 3) **Leysnibinding** (*e. solubility trapping*): Smátt og smátt leysist hluti af CO₂ í vatni. Þannig er CO₂ bundið í einum fasa og því enginn uppdrifskraftur sem drífur það til yfirborðs. Öryggi bindingarinnar eykst þannig enn frekar.
- 4) **Steindabinding** (*e. mineral trapping*): Leysing CO₂ í vatni gerir vatnið hvarfgjarnt og það fer að leysa málma á borð við kalsíum, magnesíum og járn úr berginu sem það leikur um. Þessir málmar bindast CO₂ og mynda steindir – og þannig steinrennur CO₂. Þetta er öruggasta geymsluform CO₂ enda steindir stöðugar í berggrunninum í milljónir ára.

Við niðurdælingu á CO₂ leystu í vatni til steinrenningar, líkt og Carbfix tæknin byggir á, er þessum ferlum flýtt til að auka öryggi bindingarinnar hratt, líkt og sýnt er á mynd 3.3b.

- 1) Með því að leysa CO₂ í vatni er **leysnibindingu** náð á örfáum mínútum í stað ára og áratuga; enginn uppdrifskraftur drífur það til yfirborðs og því þarf ekki þakberg yfir geymslugeyminum. Þessi hvarfgjarni CO₂-hlaðni vökví leysir málma tiltölulega hratt úr bergi á borð við basalt, sem inniheldur mikið magn af þeim málum sem þarf til að steinrenna CO₂.
- 2) Þegar styrkur málmanna er orðinn nægjanlegur í vatninu ganga þeir í efnasamband við CO₂ og falla út sem steindir. **Steindabinding** CO₂ hefur þá átt sér stað og það þannig örugglega bundið í berggrunninum. Carbfix sýndi fram á að yfir 95% af því CO₂ sem dælt var niður í tilraunaniðurdælingu í Þrengslum var steinrunnið á innan við tveimur árum, sem er mun hraðar en áður hafði verið talið mögulegt.



Mynd 3.3: Mismunandi ferli bindingar CO₂ í jarðlögum og hlutfall þeirra sem fall af tíma fyrir niðurdælingu a) til geymslu í setlögum og b) til steinrenningar í basalti.

3.3.1 Aðferðir Carbfix við niðurdælingu á CO₂

Carbfix beitir tveimur aðferðum við niðurdælingu á CO₂:

1. Niðurdælingu á hreinu CO₂ sem er leyst í vatni á ákveðnu dýpi í borholu (mynd 3.4a)

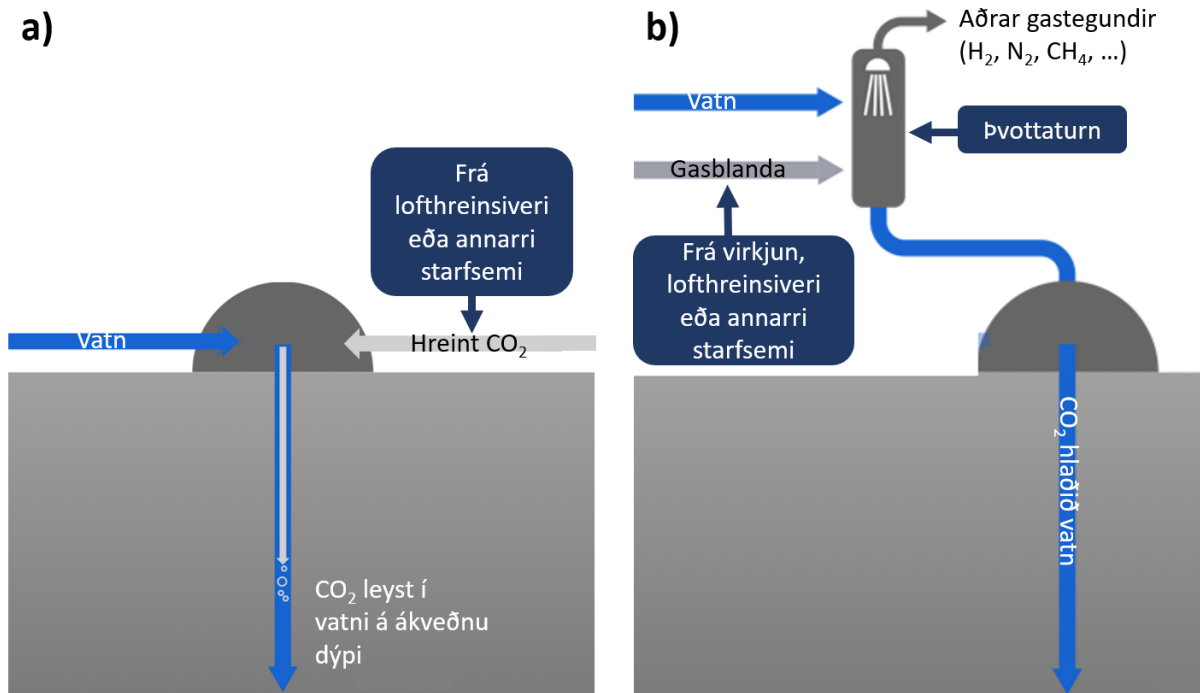
Ef um hreint CO₂ er að ræða er hægt að blanda CO₂ og vatni á ákveðnu dýpi í niðurdælingarholu og nota þá þrýsting vatnssúlunnar til að leysa CO₂ í vatninu og ná leysnibindingu (mynd 3.4a).

CO₂ og vatni er þá veitt í sitt hvorri lögninni niður í borholu og á blöndun sér stað á ákveðnu dýpi þar sem tryggt er að CO₂ leysist að fullu. Þessari aðferð var fyrst beitt í Þrengslum í tilraunaskyni árin 2011 og 2012 og er hún m.a. nýtt við niðurdælingu frá Orca lofthreinsiverinu.

2. Niðurdælingu á CO₂ sem leyst er í vatni á yfirborði (mynd 3.4b)

Ef CO₂ er í blöndu annarra gastegunda þarf að fanga CO₂ með því að leysa það í vatni í þvottarni á yfirborði (mynd 3.4b). Þannig er CO₂ hreinsað úr gasstraumnum en öðrum torleystari gastegundum á borð við nitur, vetni og metan er þá hleypt út um topp turnsins. Leysnibinding CO₂, og eftir atvikum annarra gastegunda á borð við H₂S á sér stað í þvottarninum og gashlaðna vökvanum er svo dælt undir þrýstingi að niðurdælingarholu til að tryggja að gösin haldist uppleyst. Þessari aðferð hefur verið beitt við Helligshéiðarvirkjun síðan 2014 og verður hún áfram nýtt í nýrri hreinsistöð við Helligshéiðarvirkjun. Jafnframt verður þessari aðferð beitt í Mammoth lofthreinsiverinu til að leysa CO₂ í vatni.

Niðurdælingarkerfi Carbfix tekur þannig við CO₂-hlöðnu vatni sem dælt er í niðurdælingarholur undir nægilega háum þrýstingi til að tryggja áframhaldandi leysnibindingu í niðurdælingarvökvanum þar til vökvinn streymir út í geymslugeyminn við aðstæður þar sem tryggt er að CO₂ sé uppleyst.



Mynd 3.4: Aðferðir Carbfix við niðurdælingu CO₂. a) Niðurdælingarkerfi þar sem CO₂ er leyst í vatni í borholu. b) Niðurdælingarkerfi þar sem CO₂ er leyst í vatni í þvottaturni á yfirborði.

3.3.2 Geymslugeymir fyrir niðurdælingu á CO₂

Dýpi niðurdælingar Carbfix miðast við eðli förgunar á því gasi sem fangað er. Tveir geymslugeymar eru nýttir fyrir niðurdælingu á CO₂ á Hellisheiði, annars vegar geymslugeymir í svokölluðu millikerfi og hinsvegar geymslugeymir í djúpkerfi. Niðurdæling í þessa tvo geymslugeyma sem nýttir eru fyrir niðurdælingu á CO₂ á Hellisheiði er sýnd á mynd 3.5. Í kafla 8.3 er fjallað um grunnástand geymslugeymis og um áhrif niðurdælingar CO₂ á geymslugeyminn í kafla 8.4. Í kafla 9.3.2 er fjallað um grunnástand hvað varðar vatnajarðfræði geymslusvæðisins og vatn og fjallað er um áhrif niðurdælingar CO₂ á grunnvatn í kafla 9.4.

1. Geymslugeymir í millikerfi

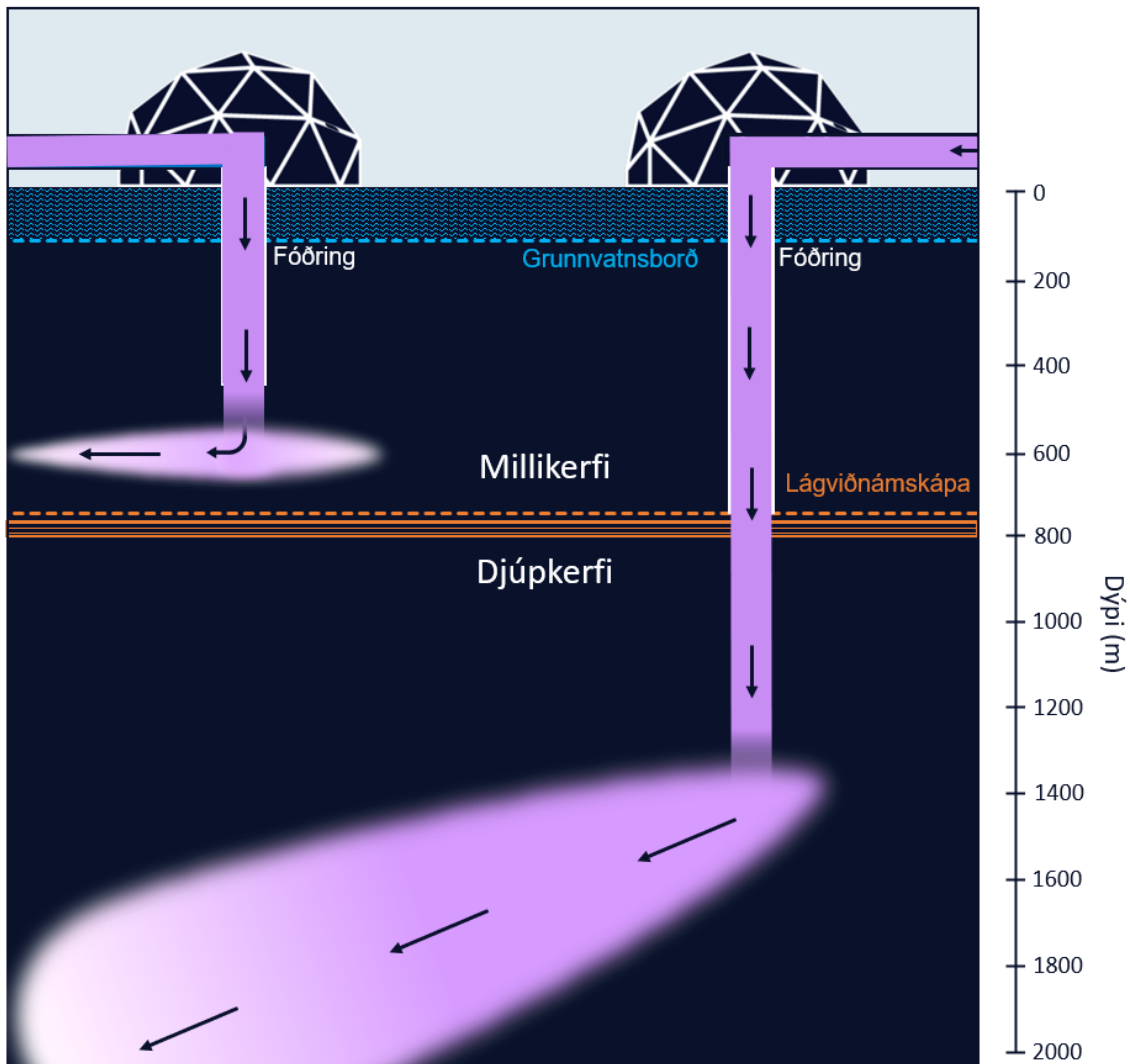
Niðurdæling Carbfix miðar í öllum tilvikum, að undanskilinni niðurdælingu á jarðhitagasi frá Hellisheiðarvirkjun, að því að dæla í svokallað millikerfi sem er á um 300 til 700-1000 m dýpi á Hellisheiði. Á Hellisheiði er farið að gæta jarðhitaáhrifa á þessu dýpi og er hiti um 30°C í efri hluta þess og um 200°C á mörkum millikerfisins og hins eiginlega jarðhitakerfis, neðan efstu grunnvatnslaga en ofan háhitakerfisins. Gögn úr borholum hafa sýnt að efsta grunnvatnskerfið á Hellisheiði er aðskilið frá neðri lögum, með þéttara móbergslagi. Niðurdæling í millikerfið hefur hvorki áhrif á grunnvatn né djúpkerfið.

Neðri mörk niðurdælingar í millikerfi markast af háhitakerfinu sjálfu og miðast skilgreind mörk millikerfis og djúpkerfis við lágviðnámskápu sem umlykur háviðnámskjarna við kortlagningu háhitakerfisins. Viðnámsmælingar nema jarðhitaummyndun og svarar háviðnám til ummyndunarbeltis sem myndast við yfir 240°C (klórít-epdót). Hitastig í millikerfinu er fýsilegt fyrir steinrenningu CO₂. Þessi mörk liggja yfirleitt á 700-1.000 m dýpi á Hellisheiði eins og áður segir.

Dýpi niðurdælingar í millikerfi miðar að því að tryggja leysnibindingu CO₂ og koma þannig í veg fyrir að vökvinn leiti upp í efri lög. Til þess þarf að tryggja að:

1) Hlutþrýstingur CO₂ í gashlaðna niðurdælingarvökvanum sé lægri en vatnsþrýstingur í vatnssúlunni þar sem vökvinn streymir út í geymslugeyminn. Fyrir CO₂ hlaðinn vökva þar sem hlutþrýstingur CO₂ er 25 bör þarf til að mynda 250 m vatnssúlu til að tryggja að gasið haldist uppleyst.

2) Niðurdælingarholur séu fódraðar nógu djúpt til að tryggja að vökvinn streymi ekki út í bergið fyrr en CO₂ er að fullu uppleyst. Dýpi á grunnvatnsborð á Hellisheiði er yfirleitt um 50-100 m. Til að tryggja leysnibindingu þarf fódring fyrir niðurdælingu í millikerfi því að vera a.m.k. 300-350 m, þ.e. 250 metra undir grunnvatnsborði, sé miðað við að hlutþrýstingur CO₂ sé 25 bör.



Mynd 3.5: Geymslugeymir Carbfix fyrir niðurdælingu á CO₂ á Hellisheiði. Í öllum tilvikum er CO₂ dælt í millikerfi á um 350 til 700-1000 m dýpi (vinstra megin), að undanskilinni niðurdælingu á CO₂ sem á uppruna sinn í jarðhitageyminum er dælt í niðurdælingarholur Hellisheiðarvirkjunar sem boraðar eru í djúpkerfi (hægra megin). Myndin sýnir dýpi niður á lágviðnámskápu er skilur að millikerfi og djúpkerfi.

2. Geymslugeymir í djúpkerfi

Öllum jarðhitavökva frá Hellisheiðarvirkjun er dælt niður í djúpkerfið líkt og virkjunarleyfi gerir ráð fyrir. Efri mörk djúpkerfisins eru þau sömu og neðri mörk millikerfisins, sjá nánari skilgreiningu í lið 1 hér að framan. Niðurdælingarholur Hellisheiðarvirkjunar eru um 15 talsins, um 1800-2500 m djúpar og fódraðar í um 600-900 m. Niðurdæling Carbfix á CO₂ frá Hellisheiðarvirkjun nýtir þessa innviði og hefur CO₂ ásamt H₂S verið dælt í tvær af þeim niðurdælingarholum sem tengdar eru

virksjuninni frá árinu 2014 ásamt vökva sem einnig á uppruna sinn í jarðhitakerfinu. Þannig er CO₂ og H₂S dælt aftur niður í djúpkerfið, þaðan sem það er upprunnið.

Hitastig í niðurdælingarholum ON er allt að 260°C en ekki er talið fýsilegt að dæla CO₂ í kerfi sem eru heitari en um 290°C. Ekki stendur til að dæla öðru gasi í djúpkerfi en því sem er upprunnið þaðan og verður fangað í hreinsistöðvum við Hellisheiðarvirkjun, bæði í ljósi mikils tilkostnaðar og lítils ávinnings við að bora svo djúpar og heitar niðurdælingarholur. Ástæða þess er fyrst og fremst tæknilegs eðlis. Borun niðurdælingarhola sem ná niður í djúpkerfið krefst tæknilegri bora og meiri öryggisbúnaðar og eru mun dýrari en borun grynri hola í jarðlög við lægra hitastig. Þá er lekt í jarðhitaummynduðum stafla yfirleitt lægri en í ferskara bergi og því til lítils að vinna að bora svo djúpt ef markmiðið er eingöngu að farga CO₂.

4 Valkostir

4.1 Valkostur sem er metinn

Carbfix vinnur mat á umhverfisáhrifum niðurdælingar CO₂ til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði í samræmi við gildandi lög nr. 111/2021 um umhverfismat framkvæmda og áætlana, sem byggja á síðustu endurskoðun á tilskipun Evrópusambandsins um mat á umhverfisáhrifum frá árinu 2014. Samkvæmt framangreindum lögum og reglugerð nr. 1381/2021 um umhverfismat framkvæmda og áætlana ber framkvæmdaraðila í umhverfismatsskýrslu, auk fyrirhugaðrar framkvæmdar, að gera grein fyrir raunhæfum valkostum sem framkvæmdaraðili hefur kannað og bera þá saman með tilliti til umhverfisáhrifa. Hvorki lög, reglugerðir né lögskýringargögn hafa að geyma nánari útlistun á því hvað teljist raunhæfir valkostir.

Lögum samkvæmt er heimilt að byggja umhverfismat eingöngu á einum valkosti á staðsetningu og útfærslu á niðurdælingu CO₂ til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði. Carbfix er hins vegar ljóst að valkostagreining þarf að vera gegnsæ, þannig að rökstuðningur fyrir því hvaða valkostur er tekinn til mats byggji á skýrum forsendum.

Í kafla 3.1 kemur fram að markmið framkvæmdar er að auka umfang og tryggja framtíð niðurdælingar CO₂ til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði. Framkvæmdin er forsenda þess að Hellisheiðarvirkjun geti verið sporlaus hvað CO₂ og H₂S varðar árið 2025, og að nýtt lofthreinsiver Climeworks (Mammoth), sem mun afhenda Carbfix CO₂ til niðurdælingar, geti tekið til starfa árið 2024. Framkvæmd Carbfix mun auk þess gera nýjum aðilum kleift að afhenda CO₂ til niðurdælingar á geymslusvæði Carbfix.

Framkvæmdinni er valinn staður á Hellisheiði þar sem aðstæður bjóða upp á að auka umsvif niðurdælingar CO₂ til geymslu í jarðlögum og stuðla jafnframt að þróun loftslagslausna sem nýtast munu á heimsvísu. Sem dæmi má nefna að Silfurberg, fyrirhugað verkefni um fullhreinsun Hellisheiðarvirkjunar, stendur eitt og sér undir allt að 10% af 55% markmiði íslenskra stjórnvalda um að draga úr losun frá orkuframleiðslu og smærri iðnaði um 55% fyrir 2030⁸.

Í ljósi framangreinds telur Carbfix að til að ná markmiðum framkvæmdarinnar á fullnægjandi hátt, auk þess að tryggja að hún sé framkvæmanleg og hagkvæm, sé ekki um aðra raunhæfa valkosti að ræða hvað varðar forsendur um niðurdælingu CO₂ á Hellisheiði frá Hellisheiðarvirkjun, nýju lofthreinsiveri, þróunarmiðstöð lofthreinsitækni og nýjum aðilum til framtíðar en á skilgreindu geymslusvæði. Raunhæfi valkostarins felst einnig í því að allir innviðir, þekking og reynsla eru til staðar til að dæla niður á þessum stað og með því niðurdælingarkerfi sem verður notað. Önnur útfærsla og staðsetning niðurdælingar CO₂ gæti orðið dýrari og erfiðari í framkvæmd.

Í megindráttum er miðað við að fyrirhuguð borsvæði verði staðsett á núverandi athafnasvæði Carbfix til niðurdælingar CO₂ og geymslu í jarðlögum á svokölluðu neðra svæði Hellisheiðarvirkjunar neðan Hamragils, í nágrenni stöðvarhúsanna við Kolviðarhól, ásamt Þrengslum, sjá **mynd 1.1** hér að framan. Þar eru fyrirhuguð borsvæði Carbfix í Jarðhitagarði, Húsmúla, Sleggjubeinsdal, Þrengslum og við Gráuhnúka, ásamt stjórnkerfum og innviðum tengdum niðurdælingarkerfi Carbfix og niðurdælingarkerfum Hellisheiðarvirkjunar.

Yfirgripsmiklar rannsóknir hafa verið gerðar á fyrirhuguðu geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði. Byggjast þær á gögnum sem safnað hefur verið við tilraunaniðurdælingu á CO₂ í Þrengslum og núverandi niðurdælingu á CO₂ í Húsmúla frá hreinsistöð ON við Hellisheiðarvirkjum, auk þess sem

⁸ Project Silverstone. What does Silverstone mean for Iceland's Climate Action Plans? www.silverstone.earth.

miklar rannsóknir hafa verið gerðar á svæðinu í tengslum við boranir og jarðhitanytingu á svæðinu. Því er mikil þekking fyrir hendi, bæði á yfirborði og jarðlögum.

Efra svæði Hellisheiðarvirkjunar er ofan við Hamragil og á Skarðsmýrarfjalli. Þar fer fram vinnsla fyrir Hellisheiðarvirkjun en lítil niðurdæling. Því eru þar minni innviðir og minni reynsla af niðurdælingu. Efra svæðið liggur einnig hærra og lengra frá öllum stjórnkerfum og núverandi niðurdælingu Carbfix. Veðurskilyrði þar eru líka erfiðari og innviðir bera þess merki, til dæmis eru slóðar grófari, og aðkoma að borsvæðum er erfiðari.

Niðurdæling Carbfix á CO₂ til geymslu í jarðlögum, sem fjallað er um í þessu umhverfismati, er fyrirhuguð á neðra svæði Hellisheiðarvirkjunar. Ekki er um aðra raunverulega valkosti að ræða hvað varðar staðsetningu eða útfærslu framkvæmdarinnar, sem hægt er að bera saman eða velja á milli. Í umhverfismatinu verður aftur á móti greint frá mismunandi útfærslum framkvæmdarinnar og fleiri en einni staðsetningu, einkum með tilliti til borsvæða og dýpis niðurdælingarhola, þar sem dælt verður í djúpkerfi geymslusvæðisins annars vegar og millikerfi hins vegar. Umhverfisáhrif allra staðsetninga og útfærslna eru metin. Áform Carbfix eru þrenns konar:

1. Niðurdæling á CO₂ og H₂S úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar í djúpkerfi

Allt að 47.000 tonnum á ári (tonn/ári) af CO₂ og allt að 11.000 tonn/ári af H₂S úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar verður dælt í djúpkerfi á Hellisheiði í fyrirbyggjandi niðurdælingarholur ON í Húsmúla. Ekki er gert ráð fyrir að bora nýjar holur vegna þessa á geymslusvæði Carbfix. Þessi niðurdæling á CO₂ og H₂S í djúpkerfi fer fram samhliða því að ON dælir affallsvatni frá virkjuninni í jarðhitageyminn í sömu borholur, í samræmi við nýtingarleyfi og starfsleyfi.

Ekki er gert ráð fyrir niðurdæling í djúpkerfi frá öðrum aðilum en ON og því er það ekki raunhæfur valkostur. Í þessu umhverfismati er gerð grein fyrir áhrifum niðurdælingar á CO₂ og H₂S frá hreinsistöðvum ON í djúpkerfi geymslusvæðisins á Hellisheiði.

2. Niðurdæling á CO₂ úr andrúmslofti frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði í millikerfi

Allt að 59.000 tonn/ári CO₂, sem fangað verður úr andrúmslofti af lofthreinsiverum Climeworks og þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni í Jarðhitagarði, verður dælt niður í millikerfi geymslusvæðisins í núverandi og nýjar holur sem boraðar verða niður á allt að 800 m dýpi. Í Jarðhitagarði og mögulega ein hola Sleggjubeinsdal. Hreint CO₂ verður leyst í vatni á ákvörðuðu dýpi í holunni. Hreint CO₂ eða CO₂ leyst í vatni verður leitt í lögnum á vegum þriðja aðila að niðurdælingarholum Carbfix. Í þessu umhverfismati er gerð grein fyrir áhrifum niðurdælingar CO₂ frá lofthreinsiverum í geymslugemy millikerfis.

3. Niðurdæling á CO₂ frá nýjum aðilum í millikerfi; frá nýrri starfsemi á athafnasvæði ON, úr andrúmslofti eða flutt á staðinn til niðurdælingar

CO₂ sem fangað verður úr andrúmslofti frá nýjum aðilum, fangað frá nýrri starfsemi á athafnasvæði ON á Hellisheiði eða flutt á staðinn frá innlendum eða erlendum aðilum, verður dælt niður í millikerfi á borsvæðum í Jarðhitagarði, við Húsmúla, í Sleggjubeinsdal, Þrengslum eða við Gráuhnúka. Nánari áform um þessi framtíðarverkefni liggja ekki fyrir en Carbfix hefur fundið fyrir gífurlegri eftirspurn eftir slíkum lausnum og því mikilvægt að meta áhrif niðurdælingar CO₂ frá framtíðarverkefnum til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði strax á þessu stigi, þannig að niðurstaða fyrir geymslusvæði liggja fyrir. Sama gildir fyrir þessi framtíðarverkefni og CO₂ frá lofthreinsiverum að gasið verður hreint eða leyst í vatni og leitt í lögnum að niðurdælingarholum Carbfix.

Gerð er grein fyrir áhrifum niðurdælingar í millikerfi í þessu umhverfismati miðað við allt að 300.000 tonn/ári af CO₂ frá nýjum aðilum

4. Niðurstaða

Með því að velja geymslusvæði Carbfix stað á núverandi athafnasvæði á Hellisheiði verður hægt að nýta innviði sem þegar eru til staðar og halda raski og fjárfestingu í lágmarki. Veðurskilyrði eru einnig talin hagstæðari en á efra svæði Hellisheiðarvirkjunar, auk þess sem mikil reynsla og þekking er fyrir hendi vegna borana, vinnslu og niðurdælingar í tengslum við rekstur Hellisheiðarvirkjunar hvað varðar eiginleika svæðisins og möguleika á aukinni niðurdælingu á CO₂ í jarðlög til lengri tíma.

Carbfix telur að nálægð við Hellisheiðarvirkjun, aðra tengda starfsemi, fyrirliggjandi innviði og áformaða uppbyggingu á þeim stað skipti miklu máli til að ná markmiðum framkvæmdar. Því er ekki talið að um sé að ræða annan raunhæfan valkost sem gera ætti grein fyrir í umhverfismati.

4.2 Núll kostur – óbreytt ástand

Núll kostur felur í sér að ekki verður af frekari framkvæmd Carbfix vegna niðurdælingar á CO₂ til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði: Í fyrsta lagi má gera ráð fyrir að núverandi hreinsistöð verði tekin úr rekstri þegar niðurdæling CO₂ á Hellisheiði nær 100.000 tonnum og í öðru lagi verður ekki ráðist í niðurdælingu CO₂ og H₂S frá nýrri hreinsistöð ON við Hellisheiðarvirkjun til geymslu í djúpkerfi á geymslusvæðinu. Þá mun niðurdæling CO₂ í millikerfi frá Orca og Mammoth lofthreinsiverum Climeworks, ásamt þróunarmiðstöð í lofthreinsitækni, takmarkast við tímabundna starfsemi Orca til ársins 2029. Í fjórða lagi verður ekki af niðurdælingu á CO₂ frá framtíðarverkefnum nýrra aðila í millikerfi geymslusvæðis Carbfix.

1. Niðurdæling á CO₂ og H₂S úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar í djúpkerfi

Markmið framkvæmdarinnar er að auka umfang og tryggja framtíð niðurdælingar CO₂ til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði. Framkvæmdin er forsenda þess að Hellisheiðarvirkjun geti verið sporlaus, hvað CO₂ og H₂S varðar, árið 2025 með niðurdælingu á nær öllu CO₂ (47.000 tonn/ári) og H₂S (11.000 tonn/ári) sem fangað verður í hreinsistöðvum úr útblæstri virkjunarinnar. Það er ekki í samræmi við markmið framkvæmdar Carbfix að ekki verði af frekari niðurdælingu CO₂ og H₂S úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar.

Ekki er vitað um aðrar lausnir til að koma í veg fyrir að CO₂ og H₂S úr útblæstri virkjunarinnar berist út í andrúmsloft. Því er fyrirsjáanlegt að brennisteinsmengun aukist í nágrenni virkjunarinnar og ekki takist að útrýma losun á CO₂ frá henni, sem er óásættanlegt að mati framkvæmdaraðila.

Með núllkosti verða ekki þau jákvæðu umhverfisáhrif á loftslag sem niðurdæling á CO₂ úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar felur í sér með samdrætti á losun, þ.m.t. samdráttur á losun sem loftslagsmarkmið íslenskra stjórnvalda gera ráð fyrir. Ekki verða heldur þau jákvæðu áhrif sem niðurdæling á H₂S úr útblæstri virkjunarinnar hefði í för með sér með því að koma í veg fyrir losun brennisteins frá virkjuninni út í andrúmsloftið.

2. Niðurdæling á CO₂ úr andrúmslofti frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði í millikerfi

Framkvæmd Carbfix er forsenda reksturs Climeworks á lofthreinsiverunum Orca og Mammoth, og nýrrar þróunarmiðstöðvar lofthreinsitækni, sem munu samanlagt afhenda Carbfix allt að 59.000 tonn/ári af CO₂ til niðurdælingar.

Verði ekki af framkvæmd Carbfix sem lýst er í umhverfismati þessu verður Orca rannsóknar- og þróunarverkefni Carbfix og Climeworks rekið til ársins 2029 samkvæmt verkefnaáætlun. Á því tímabili verður allt að 32.000 tonnum af CO₂ frá Orca lofthreinsiverinu dælt niður í millikerfið en í kjölfarið verður niðurdælingu hætt. Þá þarf að leita annarra leiða til að binda eða nýta allt að 59.000 tonn/ári af CO₂ sem fangað verður í Orca eftir þann tíma, í Mammoth lofthreinsiveri Climeworks,

sem er í byggingu, og áformaðri þróunarmiðstöð lofthreinsitækni. Þá verða ekki þau jákvæðu umhverfisáhrif á loftslag sem niðurdæling CO₂ úr andrúmslofti hefði haft.

3. Niðurdæling á CO₂ frá nýjum aðilum í millikerfi; frá nýrri starfsemi á athafnasvæði ON, úr andrúmslofti eða flutt á staðinn til niðurdælingar

Meðal markmiða framkvæmdar Carbfix er að gera nýjum aðilum í framtíðinni mögulegt að afhenda Carbfix allt að 300.000 tonn/ári af CO₂ til að dæla niður í millikerfi til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði. Þannig mun fyrirtækið stuðla að því auka umsvif kolefnisförgunar og styðja við þróun loftslagslausna til að nýta á heimsvísu. Ef ekki verður af niðurdælingu frá þessum framtíðarverkefnum verða ekki þau jákvæðu áhrif á loftslag jarðar sem samdráttur í styrk gróðurhúslofttegunda í andrúmslofti hefði í för með sér, og leita þyrfti annarra leiða til farga sama magni af CO₂.

4. Niðurstaða

Núllkostur er ekki talinn koma til greina sem raunhæfur valkostur þar sem hann uppfyllir ekki tilgang og markmið framkvæmdar Carbfix. Leita þyrfti annarra leiða til að farga allt að 406.000 tonn/ári af CO₂ og 11.000 tonn/ári af H₂S sem áætlað er að dæla niður til geymslu í djúpkerfi og millikerfi á geymslsvæði Carbfix á Hellisheiði. Auk þess samræmist það ekki opinberri stefnu Orkuveitu Reykjavíkur, móðurfyrirtækis Carbfix, sem er að fyrirtækið verði kolefnishlutlaust árið 2030.

Með núllkosti verða ekki þau neikvæðu umhverfisáhrif sem fylgja framkvæmdum við niðurdælingu og geymslu CO₂ í jarðlög í djúpkerfi og millikerfi á geymslsvæði Carbfix á Hellisheiði. Þau tengjast mögulegum áhrifum á geymslugeyminn, grunnvatn og jarðskjálftavirkni. Áhrifin verða í jarðlögum undir yfirborði í geymslugeyminum og tengjast því að CO₂ uppleystu í vatni er dælt niður í basaltberglög á mismunandi dýpi þar sem það leysir málma úr basaltinu sem ganga í efnasamband við CO₂ og falla út sem karbónatsteindir.

Með núllkosti verða ekki heldur neikvæð umhverfisáhrif sem fylgja jarðraski vegna borana nýrra niðurdælingar- og vöktunarhola, byggingu nýrra borholuhúsa til að skýla holutoppum og búnaði og stjórnbygginga, lagningu nýrra niðurgrafinna vatns- og gaslagna, auk þess sem umfang sýnilegra bygginga og mannvirkja Carbfix á fyrirhuguðu framkvæmdasvæði eykst ekki.

Ísland er aðili að rammisamningi Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar. Íslensk stjórnvöld tilkynntu markmið um aukinn samdrátt í losun gróðurhúsalofttegunda í desember 2020 miðað við árið 1990, úr 40% í 55% samdrátt eða meira til ársins 2030, í samfloti með ESB og Noregi.⁹ Í stjórnarsáttmála nýrrar ríkisstjórnar frá nóvember 2021¹⁰ voru sett fram markmið um 55% samdrátt í losun gróðurhúsalofttegunda á beinni ábyrgð Íslands árið 2030. Aðgerðaáætlun Íslands í loftslagsmálum¹¹ er safn aðgerða sem ráðist verður í til að ná markmiðum Íslands. Ein þeirra aðgerða sem er í vinnslu er föngum CO₂ frá jarðvarmavirkjunum. Meðal tilgreindra leiða til að ná markmiðum um samdrátt í losun er þróun Carbfix aðferðar við niðurdælingu á CO₂ til geymslu með bindingu í jarðlögum. Markmið rekstraraðila jarðvarmavirkjana á Íslandi er a.m.k. 47% samdráttur í losun árið 2030 miðað við 2005. Samkvæmt aðgerðaáætlun í loftslagsmálum er áætlað að samdráttur í losun vegna orkuvinnslu frá jarðvarma fram til ársins 2030 verði 108.000 tonn af CO₂-ígildum. Núllkostur samræmist ekki alþjóðlegum skuldbindingum og stefnu stjórnvalda um samdrátt í losun gróðurhúsalofttegunda, þar sem ein af tilgreindum leiðum til að ná settum markmiðum er föngun á CO₂ frá jarðvarmavirkjunum og förgun þess með niðurdælingu til geymslu í jarðlögum. Þar af leiðandi verða ekki þau jákvæðu áhrif á loftslag sem stefnt er að.

⁹ Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið, 2022.

¹⁰ Stjórnarráð Íslands, 2021.

¹¹ Umhverfis- og auðlindaráðuneytið, 2020.

5 Helstu framkvæmdaþættir og einkenni þeirra

Hér á eftir er greint frá fyrirhuguðum framkvæmdaáhrifum Carbfix sem liggja til grundvallar umhverfismati. Áform Carbfix fela í sér þrenns konar niðurdælingarverkefni, sem gerð er grein fyrir ásamt mannvirkjum sem þeim fylgja; borholum, lögnum og byggingum. Samantekt framkvæmda er að finna í kafla 5.5. Þá er fjallað um framkvæmdatíma, en gert er ráð fyrir að niðurdælingarverkefni byggist upp í þremur áföngum í tíma, auk þess sem farið er yfir frágang að framkvæmdum loknum og lokunaráætlun. Að síðustu er fjallað um leyfisveitingar til samstarfsaðila, þar sem niðurdæling Carbfix fer ávallt fram í samstarfi við föngunaraðila sem er sjálfur ábyrgur fyrir málsmeðferð sinnar framkvæmdar áður en til samstarfs um niðurdælingu á fönguðu CO₂ með aðferð Carbfix kemur. Nánar er greint frá fyrirhugaðri niðurdælingu Carbfix hér á eftir. Staðsetningu helstu framkvæmdaþátta má sjá á mynd 5.1.

5.1 Niðurdælingarverkefni Carbfix á Hellisheiði

Eins og fram kemur í kafla 1.2 hér að framan eru áform Carbfix um fyrirhugaðar framkvæmdir vegna niðurdælingar CO₂ á Hellisheiði þrenns konar:

1. Niðurdæling á CO₂ og H₂S úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar í djúpkerfi
2. Niðurdæling á CO₂ úr andrúmslofti frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði í millikerfi
3. Niðurdæling á CO₂ frá nýjum aðilum í millikerfi; frá nýrri starfsemi á athafnasvæði ON, úr andrúmslofti eða flutt á staðinn til niðurdælingar.

5.1.1 Niðurdæling á CO₂ og H₂S úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar í djúpkerfi

Núverandi hreinsistöð

Niðurdæling á CO₂ og H₂S hefur verið rekin sem hluti af rekstri Hellisheiðarvirkjunar frá árinu 2014. Frá 2014-2016 voru afköst hreinsistöðvar við Hellisheiðarvirkjun um 6.000 tonn/ári af CO₂ og um 2.500 tonn/ári af H₂S. Árið 2016 voru afköstin tvöfölduð og nema nú um 12.000 tonn/ári af CO₂ og um 5.000 tonn/ári af H₂S. Gasinu er dælt í djúpkerfið og því þannig fargað ásamt þéttivatni og skiljuvatni þaðan sem það er upprunnið.

Gasið er leyst í þéttivatni í þvottaturni við hreinsistöðina sem staðsett er við virkjunina sjálfa. Gashlöðnu þéttivatni er svo veitt undir þrýstingi að niðurdælingarsvæði virkjunarinnar við Húsmúla þar sem því er dælt í niðurdælingarholur HN-14 og HN-16 við Húsmúla (**mynd 5.1**). Carbfix er framkvæmdaraðili þeirrar niðurdælingar CO₂. Stálrör úr ryðfríu stáli, svokallað niðurdælingarrör, veitir CO₂ og H₂S hlöðnu þéttivatni niður fyrir fóðringu sem er á 690 m dýpi í HN-14 og 660 m dýpi í HN-16 til að koma í veg fyrir tæringu. Gashlaðni niðurdælingarvökvinn streymir inn í berggrunninn neðan fóðringar, en hola HN-14 er 2039 m djúp og HN-16 er 2204 m djúp. Heildarniðurdæling á CO₂ frá Hellisheiðarvirkjun nam um 84.000 tonnum 10. ágúst 2022

Ný hreinsistöð - Silfurbergsverkefnið

Nýverið hlutu Carbfix og ON styrk frá Nýsköpunarsjóði Evrópusambandsins til að fjármagna að hluta byggingu stærri hreinsistöðvar við Hellisheiðarvirkjun sem gerir kleift að hreinsa svo til allt CO₂ og H₂S frá Hellisheiðarvirkjun, eða 34-36.000 tonn/ár af CO₂ og 9-11.000 tonn/ári af H₂S sem leyst verður í þvottaturni hreinsistöðvarinnar. Verkefnið ber nafnið Silfurberg. ON er framkvæmdaraðili byggingar hreinsistöðvarinnar. Gert er ráð fyrir að hefja niðurdælingu frá nýrri hreinsistöð ON árið 2025. Carbfix er framkvæmdaraðili niðurdælingar CO₂.

Aukin niðurdæling á CO₂ og H₂S frá Hellisheiðarvirkjun felur ekki í sér niðurdælingu á auknum massa vatns. Breytingin felur aðeins í sér að meira gas er leyst í því vatni sem þegar er dælt niður. Notast verður við sömu niðurdælingarholur við Húsmúla og notaðar eru í dag fyrir niðurdælingu á CO₂ og H₂S (holur HN-16 og HN-14). Auk þess kemur til greina að útbúa holur HN-09 eða HN-12, sem staðsettar eru á sömu borteigum og HN-14 og HN-16 fyrir niðurdælingu á jarðhitagasi frá virkjuninni. Hóla HN-09 er 3.011 m og fóðruð í 785 m. Hóla HN-12 er 1.945 m djúp og fóðruð í 645 m. Í þeim tilvikum væri niðurdælingarröri komið fyrir í þeim holum líkt og í holum HN-14 og HN-16.

5.1.2 Niðurdæling á CO₂ úr andrúmslofti frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði í millikerfi

Carbfix áformar að dæla niður allt að 59.000 tonn/ár af CO₂ frá lofthreinsiverum sem staðsett verða í Jarðhitagarði í tengslum við þrjú verkefni:

- Orca lofthreinsiverið – allt að 4.000 tonn/ári af CO₂.
- Mammoth lofthreinsiverið – allt að 40.000 tonn/ári af CO₂.
- Þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni – allt að 15.000 tonn/ári af CO₂.

Niðurdæling frá Orca lofthreinsiveri

Lofthreinsiverið Orca sem rekið er af Climeworks í Jarðhitagarði var gangsett í september 2021. Afkastageta þess er um 4.000 tonn/ári af CO₂ sem fangað er úr andrúmslofti. Carbfix sér um niðurdælingu á þessu CO₂. Niðurgráfin gaslögn liggur frá Jarðhitagarði og leiðir hreint CO₂ að borsvæði Carbfix í Þrengslum þar sem gasinu er dælt niður. CO₂ er veitt á gasformi í niðurdælingarholu HN-02 þar sem það er leyst upp í ~3-4 l/s af vatni sem dælt er á holuna úr holum HN-01 og HK-24 sem staðsettar eru á næsta borteig í Þrengslum (**mynd 5.2**).

Hóla HN-02 tekur við öllu CO₂ frá Orca. HN-02 er 1.997 m djúp og fóðruð á 400 m dýpi. CO₂ er leyst í vatni á rúmlega 100 m dýpi í holunni í plaströri sem veitir blöndunni niður á 500 m dýpi þar sem gashlaðni niðurdælingarvökvinn streymir inn í berggrunninn neðan fóðringar í millikerfi. Auk HN-02 er gert ráð fyrir að hægt verði að dæla í holu HN-04 á sama teig, t.d. ef hætta þarf niðurdælingu í HN-02 vegna viðhalds. HN-04 er 1.204 m djúp og fóðruð í 395 m.

Niðurdæling frá Mammoth lofthreinsiveri

Áætlað er að fanga allt að 40.000 tonn/ári af CO₂ úr andrúmslofti með loftsugum í nýju og stærra lofthreinsiveri sem Climeworks hyggst reisa í Jarðhitagarði og ber nafnið Mammoth. Áformað er að Climeworks afhendi Carbfix CO₂ tilbúið til niðurdælingar eftir að það hefur verið leyst í vatni í þvottaturni lofthreinsiversins. Gashlaðna vatninu verður dælt að niðurdælingarholum í niðurgröfnum lögnum.

Gert er ráð fyrir að niðurdæling CO₂ frá Mammoth lofthreinsiverinu hefjist í ársbyrjun 2024. Áformað er að þessu CO₂ verði dælt í allt að þrjár nýjar niðurdælingarholur Carbfix sem staðsettar verða á lóð Mammoth í Jarðhitagarði ON (**mynd 5.2**). Holuhönnun gerir ráð fyrir að dælt verði í millikerfi, holurnar verði boraðar í um 700 m og fóðraðar í 350-500 m.

Niðurdæling frá þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni í Jarðhitagarði eða í Sleggjubeinsdal

Áformað er að setja upp þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni á Hellisheiði í samstarfi við Carbfix og ON. Tilgangur þróunarmiðstöðvar er að nýir aðilar geti komið með tæknilausnir sínar og prófað þær í raunaðstæðum og jafnframt fengið aðgang að rafmagni, vatni og niðurdælingu á því CO₂ sem þau fanga. Gert er ráð fyrir að lausnir séu prófaðar á tilraunaskala og að hver aðili geti afkastað

allt að 1.000 tonn/ári af CO₂, en mögulega myndu nokkrir aðilar prófa tæknina sína á sama tíma. Gert er ráð fyrir að niðurdæling frá þróunarmiðstöðinni verði allt að 15.000 tonn/ári af CO₂ og hefjist fyrir árslok 2024.

Dælt verður í eina niðurdælingarholu í Jarðhitagarði eða í Sleggjubeinsdal (**mynd 5.2**) og verður CO₂ annað hvort leyst í þvottaturni á yfirborði eða í vatni í borholu (sjá kafla 3.3.1 um aðferðir Carbfix við niðurdælingu á CO₂). Holuhönnun gerir ráð fyrir að dælt verði í millikerfi, holan verði boruð í um 700 m og fóðruð í 350-500 m.

5.1.3 Niðurdæling á CO₂ frá nýjum aðilum í millikerfi; frá nýrri starfsemi á athafnasvæði ON, úr andrúmslofti eða flutt á staðinn til niðurdælingar

Carbfix gerir ráð fyrir að geta tekið við allt að 300.000 tonn/ári af CO₂ til niðurdælingar frá nýjum aðilum í millikerfi geymslusvæðisins. Því CO₂ sem fangað verður af nýjum aðilum verður annað hvort dælt niður uppleystu í vatni eða sem hreinu CO₂ á gasformi sem leyst verður í vatni í borholu (sjá kafla 3.3.1 um aðferðir Carbfix við niðurdælingu á CO₂). Ákvörðun um útfærslu verður tekin út frá hverju verkefni fyrir sig.

Gert er ráð fyrir að bora allt að 18 niðurdælingarholur fyrir þessi framtíðarverkefni og er þeim möguleika haldið opnum að bora þær allar í Jarðhitagarði eða að hluti þeirra verði boraður á skilgreindum borsvæðum Hellisheiðarvirkjunar við Húsmúla, við Gráuhnúka, í Þrengslum og Sleggjubeinsdal (**mynd 5.2**). Holuhönnun gerir ráð fyrir að dælt verði í millikerfi, holurnar verði boraðar í um 700-1000 m og fóðraðar í 350-500 m

5.1.4 Samantekt niðurdælingarverkefna

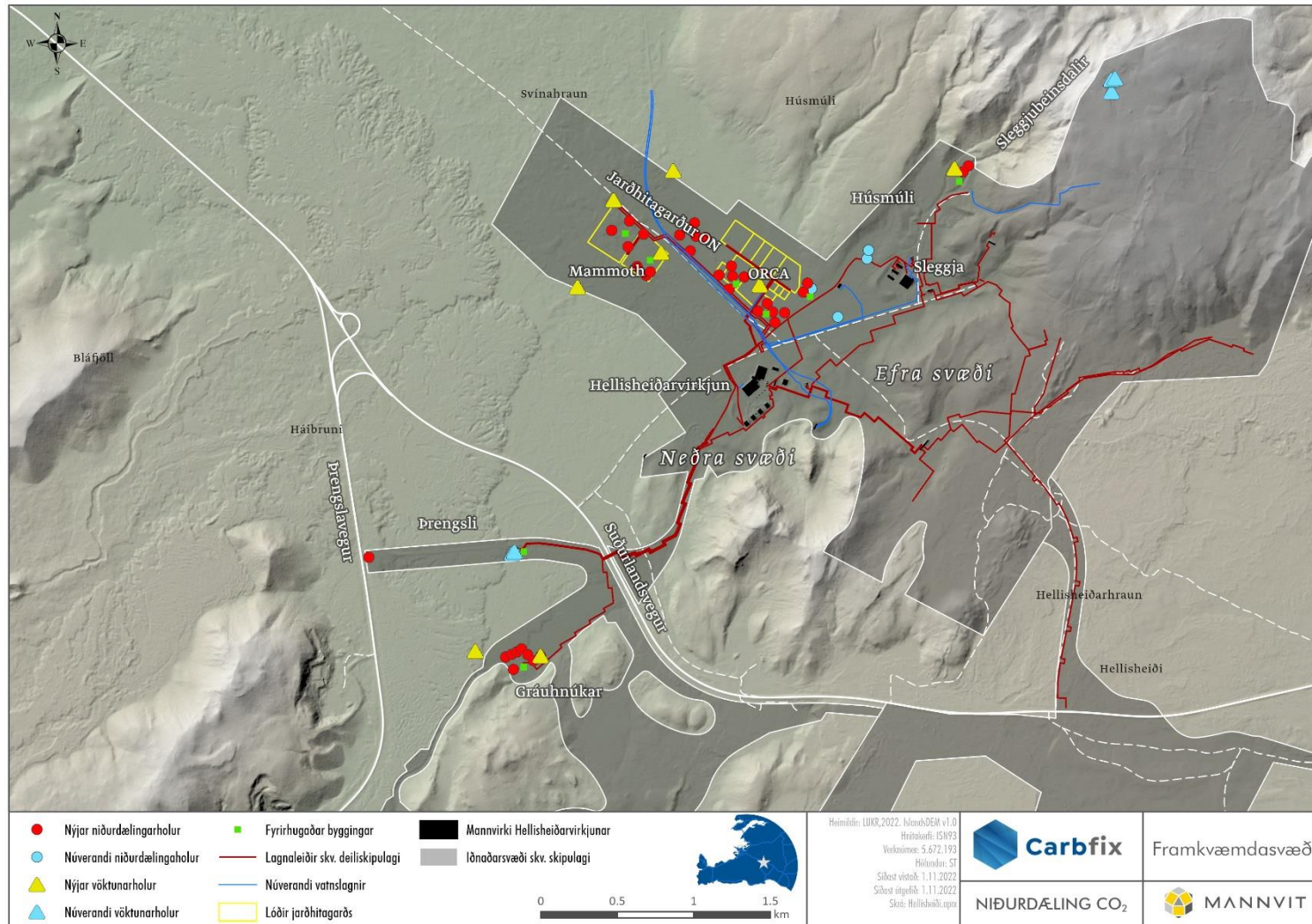
Í **töflu 5.1** er yfirlit yfir núverandi og fyrirhugaða niðurdælingu CO₂ á geymslusvæði Carbfix.

Tafla 5.1: Yfirlit yfir núverandi og fyrirhugaða niðurdælingu á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði.

	Niðurdæling		Borsvæði		Niðurdælingarholur		Vöktunarholur	
	Magn CO ₂ allt að tonn/ári	Aðferð	Svæði	Geymslugeymir	Núverandi	Nýjar**	Núverandi	Nýjar
Hreinsistöð við Hellisheiðarvirkjun	11.000*	Þvottaturn	Húsmúli	Djúperki	HN-16, HN-14	-	HE-31, HE-44, HE-48	-
Ný hreinsistöð við Hellisheiðarvirkjun	36.000*	Þvottaturn	Húsmúli	Djúperki	HN-16, HN-14, HN-09 og/eða HN-12	-	HE-31, HE-44, HE-48	-
Orca lofthreinsiver	4.000	Leyst í holu	Þrengsli	Millikerfi	HN-02, HN-04**	-	HN-04**, HK-34	-
Mammoth lofthreinsiver	40.000	Þvottaturn	Jarðhitagarður	Millikerfi		3		1
Þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni	15.000	Óákveðið	Jarðhitagarður	Millikerfi		1		0
Niðurdæling frá nýjum aðilum	300.000	Óákveðið	Jarðhitagarður, Sleggjubeinsdalur, Húsmúli, Þrengsli, Gráuhnúkar**	Millikerfi	-	18		6
Alls	406.000					22		7

*Magn miðast við afköst hreinsistöðva. Heildarlosun frá Hellisheiði er allt að 45.000 tonn/ári CO₂. Eftir að ný hreinsistöð verður tekin í gagnið mun núverandi hreinsistöð taka það sem uppá vantar til að fanga allt CO₂ frá virkjun.

**Nýtist ekki sem vöktunarhola ef holan verður notuð sem niðurdælingarhola í Orca verkefninu.



Mynd 5.1: Afstöðumynd af staðsetningum núverandi niðurdælingar- og vöktunarhola og lögnum ásamt mögulegum staðsetningum nýrra niðurdælingar- og vöktunarhola á geymslusvæði Carbfix. Sýnd staðsetning nýrra hola í Jarðhitagarði er eingöngu til skýringar, því staðsetning þeirra verður ákveðin í hverju verkefni fyrir sig í samráði við samstarfsaðila. Þá fer heildarfjöldi nýrra hola ekki yfir 22.

5.2 Borholur

- Áætlað er að bora nýjar niðurdælingar- og vöktunarholur á borsvæðum í Jarðhitagarði, Húsmúla, Sleggjubeinsdal, í Þrengslum og við Gráuhnúka á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði. Í **töflu 5.2.** er heildarfjöldi nýrra borhola í tengslum við verkefnið tekinn saman.

Niðurdælingarholur

Nýjar niðurdælingarholur verða allar hannaðar fyrir niðurdælingu í millikerfi, þ.e.a.s fóðraðar í 350-500 m og eru að hámarki 700-1000 m djúpar fyrir niðurdælingu í geymslugeymi í millikerfi (sjá nánar í kafla 3.3.2). Þeim möguleika er haldið opnum að bora allar 22 nýjar niðurdælingarholur í Jarðhitagarði sem og að dreifa niðurdælingu á mismunandi borsvæði (**mynd 5.1**) þar sem gert er ráð fyrir hámarksfjölda innan hvers svæðis, þó þannig að heildarfjöldi nýrra borhola til niðurdælingar CO₂ fari ekki yfir 22 holur.

Að auki verður dælt áfram í djúpkerfið í þær niðurdælingarholur sem þegar eru nýttar á svæðinu til niðurdælingar jarðhitavökva frá Hellisheiðarvirkjun:

- Holur HN-14 og HN-16 við Húsmúla sem þegar eru nýttar sem niðurdælingarholur fyrir CO₂ og H₂S frá núverandi hreinsistöð Hellisheiðarvirkjunar.
- Holur HN-09 og/eða HN-12 við Húsmúla sem nýttar eru sem niðurdælingarholur fyrir jarðhitavökva frá Hellisheiðarvirkjun. Til greina kemur að breyta þessum holum svo þær geti einnig tekið við CO₂ og H₂S frá nýrri hreinsistöð Hellisheiðarvirkjunar (Silfurberg).

Vöktunarholur

Auk niðurdælingarhola eru vöktunarholur nýttar til vöktunar á þeim ferlum sem eiga sér stað í geymslugeyminum. Vöktunarholur eru borholur sem eru í tengslum við geymslugeyminn og eru ýmist boraðar sérstaklega í þeim tilgangi en í sumum tilvikum verða borholur sem þegar eru til staðar nýttar í sama tilgangi. Vöktunarholur sem boraðar eru sem slíkar eru grennri en niðurdælingarholur og ekki fóðraðar jafn djúpt en boraðar í sama dýpi. Tekin eru vatnssýni úr vöktunarholum til að fylgjast með þeim efnahvörfum sem verða neðanjarðar við niðurdælingu á CO₂. Nú eru sex holur nýttar til vöktunar á niðurdælingu CO₂ á Hellisheiði (**mynd 5.1**):

- Holur HE-31, HE-44 og HE-48 á Skarðsmýrarfjalli fyrir vöktun á niðurdælingu frá hreinsistöð við Hellisheiðarvirkjun. Gert er ráð fyrir að nýta þær áfram fyrir vöktun niðurdælingar frá nýrri hreinsistöð við virkjunina.
- Holur HN-04 og HK-34 fyrir vöktun á niðurdælingu í Þrengslum.

Auk núverandi vöktunarhola er gert ráð fyrir að bora allt að sjö vöktunarholur í tengslum við niðurdælingu á CO₂ á Hellisheiði, en greint er frá þeim í **töflu 5.2.**

Tafla 5.2 sýnir yfirlit yfir mögulega staðsetningu og fjölda áætlaðra niðurdælingarhola og vöktunarhola á mismunandi svæðum. Nánari grein er gerð fyrir hvernig niðurdælingarholur munu taka við CO₂ frá tengdum framkvæmdum hér að neðan.

Tafla 5.2: Yfirlit yfir núverandi og nýjar niðurdælingar- og vöktunarholur fyrir CO₂ á Hellisheiði.

Borsvæði	Niðurdæling	Niðurdælingar-holur		Vöktunarholur	
	Geymslugeymir	Núverandi	Nýjar	Núverandi	Nýjar
Húsmúli	Djúpkerfi	1-2	0	3	-
Húsmúli	Millikerfi	-	0-2	-	-**
Þrengsli	Millikerfi	1-2	0-1	5	-
Jarðhitagarður	Millikerfi	-	0-22	-	4
Sleggjubeinsdalur	Millikerfi	-	0-2	-	1
Gráuhnúkar	Millikerfi	-	0-8	-	2
	Alls	2-4	22*	8	7

*Gert er ráð fyrir að bora allt að 22 nýjar niðurdælingarholur á Hellisheiði.

**Fyrirhugaðar vöktunarholur í Jarðhitagarði þjóna einnig vöktun fyrir niðurdælingu í millikerfi í Húsmúla.

5.3 Byggingar

5.3.1 Byggingar vegna niðurdælingar á CO₂ og H₂S frá Hellisheiðarvirkjun í djúpkerfi

Engar nýjar byggingar eru fyrirhugaðar á vegum Carbfix vegna niðurdælingar frá Hellisheiðarvirkjun.

Byggingar vegna niðurdælingar frá núverandi hreinsistöð Hellisheiðarvirkjunar

Engar byggingar hafa verið reistar í tengslum við niðurdælingu CO₂ frá Hellisheiðarvirkjun. Búnaði á núverandi niðurdælingarholum (HE-14 og HN-16) er skýlt með kúluhúsum. Slík kúluhús eru á flestum vinnslu- og niðurdælingarholum Hellisheiðarvirkjunar (**mynd 5.2**).



Mynd 5.2: Niðurdælingarhola HN-16 sem er CO₂ niðurdælingarhola Hellisheiðarvirkjunar.

Byggingar vegna niðurdælingar frá nýrri hreinsistöð Helligshéiðarvirkjunar

Engar byggingar eru fyrirhugaðar á vegum Carbfix vegna niðurdælingar frá nýrri hreinsistöð Helligshéiðarvirkjunar. ON er framkvæmdaraðili nýju hreinsistöðvarinnar. Niðurdæling verður í sömu holur og dælt er í nú þegar vegna starfsemi Helligshéiðarvirkjunar.

5.3.2 Byggingar vegna niðurdælingar CO₂ úr andrúmslofti frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði í millikerfi

Byggingar vegna niðurdælingar frá Orca lofthreinsiveri

Niðurdæling frá Orca fer fram á borsvæði í Þrengslum. Núverandi niðurdælingar- og vöktunarkerfi Carbfix sem fær CO₂ frá Orca loftshreinsiveri Climeworks er hýst í einni 50 m² byggingu í Þrengslum sem hýsir stjórnbúnað. Einnig hýsir svæðið tvö kúluhús á niðurdælingarholu annars vegar og aðalvöktunarholu verkefnisins hins vegar.

Í byggingunni eru stjórnrymi, ferilefnarymi, rymi fyrir loftpressu og votrymi þar sem flæði vatns og gass í átt að niðurdælingarholu er stýrt. **Mynd 5.3** sýnir afstöðu byggingarinnar og kúluhúss sem hýsir borholu HN-02 sem er niðurdælingarhola. Aftan við HN-02 og utan kúluhússins er vöktunarholan HN-04 sem er lokuð og aftast á myndinni er vöktunarholan HK-34 í kúluhúsi.



Mynd 5.3: Mannvirki niðurdælingarkerfis í Þrengslum. Fremra kúluhús skýlir holu HN-02.

Fyrirhugaðar byggingar vegna niðurdælingar frá Mammoth lofthreinsiveri

Carbfix mun fá CO₂ afhent tilbúið til niðurdælingar eftir að það hefur verið leyst í vatni í þvottaturni Mammoth lofthreinsivers Climeworks í Jarðhitagarði.

Niðurdælingarkerfi Carbfix, ásamt vöktunarkerfi verður hýst í kúluhúsum á niðurdælingarholum. Kúluhúsin verða byggð yfir niðurdælingarholur sem verða staðsettar á lóð Mammoth í Jarðhitagarði. Kúluhúsin vernda mæli- og stjórnbúnað á holutoppum. Gert er ráð fyrir að kúluhús verði 6 metrar í þvermál og u.þ.b. 3 metra há. Sambærileg hús má sjá á **mynd 5.3**.

Fyrirhugaðar byggingar vegna þróunarmiðstöðvar fyrir lofthreinsitækni

Gert er ráð fyrir að byggingar tengdar niðurdælingarkerfum þróunarmiðstöðvar fyrir lofthreinsitækni verði helst staðsettar í Jarðhitagarði og í Sleggjubeinsdal. Það mun koma til greina að hafa stjórnbyggingar og kúluhús sem verða þá byggð í tengslum við framkvæmdir þróunarmiðstöðvar.

Stjórnbyggingar verða almennt í líkingu við núverandi stjórnbyggingu Orca í Þrengslum, þ.e. 50-100 m² á einni hæð.

Á borteigum stendur einungis til að reisa kúluhús sem skýla búnaði á niðurdælingarholum og eftir atvikum á vöktunarholum ef þörf er talin á.

5.3.3 Fyrirhugaðar byggingar vegna niðurdælingar á CO₂ frá nýjum aðilum í millikerfi; frá nýrri starfsemi á athafnasvæði ON, úr andrúmslofti eða flutt á staðinn til niðurdælingar.

Gert er ráð fyrir að byggingar tengdar niðurdælingarkerfum verði helst staðsettar við niðurdælingarholur í Jarðhitagarði og á borsvæðum í Húsmúla, í Sleggjubeinsdal í Þrengslum og við Gráuhnúka. Það kemur til greina að hafa kúluhús sem verða þá byggð í tengslum við framkvæmdir nýrra aðila. Einnig kemur til greina að byggja stjórnbyggingar sem verða almennt í líkingu við núverandi stjórnbyggingu Orca í Þrengslum, þ.e. 50-100 m² á einni hæð.

5.3.4 Samantekt yfir nýjar byggingar

Gert er ráð fyrir að reisa allt að fjórar nýjar stjórnbyggingar. Gert er ráð fyrir að þær geti allar risið í Jarðhitagarði, en jafnframt kemur til að greina að reisa eina á borsvæði í Húsmúla, eina í Sleggjubeinsdal og eina við Gráuhnúka, þó aldrei fleiri en fjórar í heildina. Í **töflu 5.3** er yfirlit yfir byggingar sem eru fyrirhugaðar vegna framkvæmdar Carbfix. Sjá má tillögu að staðsetningu stjórnbygginga á **mynd 5.1** en nákvæm staðsetning þeirra verður útfærð í hverju verkefni fyrir sig.

Gert er ráð fyrir að reisa allt að 22 kúluhús, líkum þeim sem þegar eru á vinnslu- og niðurdælingarholum á Hellisheiði til að skýla niðurdælingarholum Carbfix. Til greina kemur að reisa þau í Jarðhitagarði, en einnig kemur til að greina að reisa allt að tvö í Húsmúla, allt að einu í Þrengslum og allt að átta við Gráuhnúka, þó aldrei fleiri en 22 í heildina. Loks er þeim möguleika haldið opnum að reisa skýli yfir vöktunarholur sem staðsettar eru innan lóðamarka í Jarðhitagarði (þrjár) og borsvæðum í Sleggjubeinsdal (ein) og Gráuhnúkum (ein), alls fimm talsins.

Tafla 5.3: Yfirlit yfir nýjar byggingar sem fyrirhugað er að reisa vegna framkvæmdar Carbfix.

Borsvæði	Stjórnbygging - fjöldi	Fermetrar - hámark	Kúluhús - fjöldi	Fermetrar - hámark
Húsmúli – djúpkerfi	0	0	0	0
Húsmúli – millikerfi	1	100	2	60
Þrengsli	0	0	1	30
Jarðhitagarður	4	400	25	750
Sleggjubeinsdalur	1	100	3	90
Gráuhnúkar	1	100	9	270

5.4 Lagnir

Gert er ráð fyrir að samstarfsaðilar, sem fanga og afhenda CO₂ til niðurdælingar með aðferð Carbfix, leggi lagnir að niðurdælingarkerfi Carbfix. Útmörk niðurdælingarkerfis Carbfix eru nálægt holutoppum niðurdælingarhola. Lagnir sem gert er ráð fyrir að Carbfix leggi eru beinar, um það bil 250 mm í þvermál og eru nokkrir metrar að lengd. Á þessum lögnum eru rennslismælur staðsettir til að lágmarka mæliskekkju.

5.4.1 Lagnir vegna niðurdælingar á CO₂ og H₂S frá Hellisheiðarvirkjun í djúpkerfi

Allar fyrirliggjandi gas-, vatns-, ljósleiðara- og raflagnir að og á núverandi borsvæði við Húsmúla eru niðurgrafnar. Engar breytingar verða gerðar á fyrirliggjandi lögnum vegna þeirra áforma Carbfix sem eru hluti af umhverfismati niðurdælingar CO₂ á Hellisheiði. Helstu framkvæmdaþætti CO₂ niðurdælingar Carbfix má sjá á mynd 5.1. hér að framan.

Lagnir vegna niðurdælingar CO₂ frá nýrri hreinsistöð

Engar framkvæmdir eru fyrirhugaðar á vegum Carbfix vegna niðurdælingar frá nýrri hreinsistöð Hellisheiðarvirkjunar. Dælt verður áfram í sömu borholur við Húsmúla, holur HN-14 og HN-16. Lagnir á vegum ON verða lagðar í jörðu samhliða þeim lögnum sem fyrir eru milli hreinsistöðvar og niðurdælingarsvæðis ON.

5.4.2 Lagnir vegna niðurdælingar CO₂ úr andrúmslofti frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði í millikerfi

Lagnir vegna niðurdælingar CO₂ frá Orca lofthreinsiveri

Allar fyrirliggjandi gas-, vatns-, ljósleiðara- og raflagnir að og á núverandi borsvæði í Þrengslum eru niðurgrafnar. Niðurgravin 3 km löng gaslögn liggur frá Orca lofthreinsiveri og leiðir hreint CO₂ að niðurdælingarholu Carbfix í Þrengslum þar sem gasinu er dælt niður. Gaslögnin liggur meðfram öðrum lögnum sem tengjast starfsemi Hellisheiðarvirkjunar meðfram Reykjafelli og undir Suðurlandsveg.

Engar breytingar verða gerðar á fyrirliggjandi lögnum vegna þeirra áforma Carbfix sem eru hluti af umhverfismati niðurdælingar CO₂ á Hellisheiði.

Fyrirhugaðar lagnir vegna niðurdælingar CO₂ frá Mammoth lofthreinsiveri Climeworks

Gert er ráð fyrir að Climeworks leggi niðurgrafna lögn til að flytja gashlaðið vatn frá Mammoth, lofthreinsiveri fyrirtækisins í Jarðhitagarði, að nýjum niðurdælingarholum, sem verða á lóð Mammoth. Niðurgraffinn rafstrengur verður lagður frá Mammoth lofthreinsiverinu að niðurdælingarholum Carbfix sem verða boraðar á lóð Mammoth.

Fyrirhugaðar lagnir vegna niðurdælingar frá þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni

Gert er ráð fyrir að gas-, vatns-, ljósleiðara- og raflagnir fyrir verkefni sem munu tengjast þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni verði lagðar af viðkomandi aðilum eftir því sem við á meðfram fyrirliggjandi lagnaleiðum og vegslóðum á svæðinu. Þannig er raski haldið í lágmarki og einnig er möguleiki á samnýtingu á núverandi innviðum.

5.4.3 Lagnir vegna niðurdælingar á CO₂ frá nýjum aðilum í millikerfi; frá nýrri starfsemi, úr andrúmslofti eða flutt á staðinn til niðurdælingar.

Gert er ráð fyrir að gas-, vatns-, ljósleiðara- og raflagnir fyrir verkefni sem munu tengjast nýjum aðilum verði lagðar af viðkomandi aðilum og verði annað hvort innan lóðar viðkomandi, eða meðfram fyrirliggjandi lagnaleiðum og vegslóðum á svæðinu. Þannig er raski haldið í lágmarki og einnig er möguleiki á samnýtingu á núverandi innviðum.

5.4.4 Samantekt yfir nýjar lagnir

Gert er ráð fyrir að allar nýjar lagnir verði lagðar í núverandi lagnabelti eins og þau eru skilgreind á athafnasvæði ON. Lagnabeltin má sjá á mynd 5.4 á deiliskipulagsupprætti Hellisheiðar-

virksunar. Lagnabelti þessi, tengja saman öll fyrirhuguð borsvæði Carbfix, þ.e. Jarðhitagarð, Húsmúla, Sleggjubeinsdal, Þrengsli og Gráuhnúka, sem staðsett eru innan bláu hringjanna á myndinni. Kennistærðir nýrra lagna á vegum Carbfix eru ekki þekktar fyrir verkefni í þriðja áfanga, þ.e. niðurdælingu frá nýjum aðilum, þar sem ákveðið verður í hverju verkefni fyrir sig hvar niðurdæling fer fram, en gert er ráð fyrir að hún geti farið fram á lóð viðkomandi aðila eða á einu fyrirhugaðra borsvæða Carbfix. Vatns- og gaslagnir liggja frá starfsemi föngunaraðila að niðurdælingarholum Carbfix. Frá Jarðhitagarði að Sleggjubeinsdal eru um það bil 2 km meðfram núverandi lagnabelti, en frá Jarðhitagarði að Þrengslum og Gráuhnúkum eru um það bil 3,5 km meðfram núverandi lagnabelti. Raflagnir i munu í flestum tilfellum liggja frá Helligshéiðarvirkjun að niðurdælingarholum.

Þar sem gert er ráð fyrir að samstarfsaðilar leggi lagnir að niðurdælingarkerfi Carbfix er ekki gert ráð fyrir að Carbfix sé framkvæmdaaðili lagna, nema að litlu leyti, þar sem útmörk niðurdælingarkerfis Carbfix er nálægt holutoppum niðurdælingarhola. Miðað við að boraðar verði allt að 22 nýjar niðurdælingarholur og að frá hverri liggi lögn frá holutoppi um það bil 5-10 metra til að koma þar fyrir rennismæli á beinum kafla má gera ráð fyrir að heildarlengd lagna sem Carbfix leggur verði á bili 110-220 metrar og að þvermál lagna verði allt að 250 mm.

5.5 Samantekt framkvæmda

Í töflu 5.4 er gerð grein fyrir helstu kennistærðum fyrirhugaðrar framkvæmdar.

Tafla 5.4: Helstu kennistærðir framkvæmdar Carbfix á CO₂ geymslusvæðinu á Hellisheiði.

	Að hámarki	Skýring
Magn CO₂ í millikerfi	359.000 tonn/ári	Allt að 4.000 frá Orca, 40.000 frá Mammoth, 15.000 frá Þróunarmiðstöð um lofthreinsitækni og 300.000 frá nýjum aðilum.
Magn CO₂ í djúpkkerfi	47.000 tonn/ári	Allt að 36.000 frá nýrri hreinsistöð ON og allt að 11.000 frá nýverandi hreinsistöð.
Magn H₂S í djúpkkerfi	11.000 tonn/ári	Ný hreinsistöð hreinsar því sem næst allt H ₂ S úr vinnslurás virkjunarinnar.
Fjöldi nýrra niðurdælingarhola í millikerfi	22	Til greina kemur að öll niðurdæling í nýjar holur verði í Jarðhitagarði, en jafnframt að dreifa henni á borsvæði í Sleggjubeinsdal, Húsmúla, Þrengslum eða við Gráuhnúka auk Jarðhitagarðs.
Fjöldi nýrra vöktunarhola	7	Gefi niðurstöður eftirlits til kynna að fleiri vöktunarhola verði þörf kemur til greina að bora fleiri vöktunarholur.
Byggingarmagn	1.300 m ²	Gert er ráð fyrir allt að fjórum stjórnstöðvum 50-100 m ² og allt að 27 kúluhúsum 25-30 m ² að stærð. Til greina kemur að reisa allar byggingar innan Jarðhitagarðs eða að hluta þar og að hluta í Húsmúla, Sleggjubeinsdal, Þrengslum og við Gráuhnúka.
Áætlað rask	24.000 m ²	Vegna byggingarreita stjórnbygginga og borplana fyrir nýjar niðurdælingar- og vöktunarholur á óröskuðu svæði í Jarðhitagarði og utan núverandi borsvæða
Rafmagnsnotkun	~1-2 MW	Carbfix semur við ON um afhendingu á rafmagni.
Vatnsnotkun	250 L/s	Carbfix semur við ON um afhendingu á vatni.
Lagnir	110-220 m	Gert er ráð fyrir að lagnir liggi annað hvort alfarið innan lóðar samstarfsaðila, eða innan borsvæða Carbfix. Lagnir ná 5-10 m frá hverjum holutoppi að rennismæli.

5.6 Framkvæmdatími

Gert er ráð fyrir að verkefnum Carbfix við niðurdælingu CO₂ á Hellisheiði verði skipt upp í þrjá framkvæmdaáfanga hvað varðar tímaröð og er gerð grein fyrir þeim hér að neðan.

Carbfix vinnur að umsókn um starfsleyfi til geymslu CO₂ í jörðu fyrir fyrsta og annan áfanga samhliða vinnu við gerð umhverfismats.

Fyrsti áfangi - Niðurdæling á CO₂ úr andrúmslofti frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði í millikerfi

Fyrsti áfangi framkvæmdar Carbfix telur niðurdælingu CO₂ frá Orca lofthreinsiverinu í millikerfi sem hóf starfsemi í rannsóknar- og þróunarskyni í september 2021 og frá Mammoth lofthreinsiverinu sem gert er ráð fyrir að verði ræst í sex áföngum á árinu 2024 og verði komið í full afköst í lok árs 2024. Í fyrsta áfanga er því gert ráð fyrir niðurdælingu sem nemur allt að 44.000 tonn/ári af CO₂ í

millikerfi í Jarðhitagarði og í Þrengslum. Gert er ráð fyrir allt að þremur nýjum niðurdælingarholum á lóð Mammoth í Jarðhitagarði.

Ekki er gert ráð fyrir borun nýrra vöktunarhola í tengslum við niðurdælingu frá Orca, en vöktun fer fram í núverandi holum HN-04 og HK-34 á Þrengsla svæðinu. Gert er ráð fyrir borun einnar nýrrar vöktunarholu á geymslusvæði Carbfix vegna niðurdælingar frá Mammoth og verður hún staðsett norðaustan við fyrrihugaðar niðurdælingarholur, á lóð Mammoth.

Í fyrsta áfanga er einnig gert ráð fyrir gangsetningu Þróunarmiðstöðvar fyrir lofthreinsitækni í Jarðhitagarði fyrir allt að 15.000 tonn/ári. Gert er ráð fyrir að gangsetning verði í áföngum frá þriðja ársfjórðungi 2024 til 2025. Gert er ráð fyrir borun einnar niðurdælingarholu í millikerfi í Jarðhitagarði, eða í Sleggjubeinsdal, en vöktun fer fram í vöktunarholu í Jarðhitagarði eða Sleggjubeinsdal.

Borsvæði	Geymslu-geymir	Magn tonn/ári (allt að)	Nýjar niðurdælingarholur (allt að)	Nýjar vöktunarholur (allt að)
Þrengsli	Millikerfi	4.000	0	0
Jarðhitagarður	Millikerfi	55.000	4	1
Sleggjubeinsdalur	Millikerfi	15.000	1	1
Alls*		59.000	4	2

*Samtala nýrra niðurdælingarhola fer ekki yfir fjórar í 1. áfanga, en fjórða holan verður annað hvort staðsett í Jarðhitagarði eða Sleggjubeinsdal. Þá fer samtala niðurdælingar ekki yfir 59.000 tonn/ári í heildina fyrir 1. áfanga.

Annar áfangi – Niðurdæling á CO₂ og H₂S úr útblæstri Helligshólavirkjunar í djúpkerfi.

Í öðrum áfanga er gert ráð fyrir niðurdælingu frá nýrri hreinsistöð Helligshólavirkjunar, sem einnig er kennd við Silfurberg og snýr að fullhreinsun á CO₂ og H₂S úr útblæstri Helligshólavirkjunar. Hún felur í sér aukningu á niðurdælingu CO₂ í djúpkerfið úr 12.000 tonn/ári í allt að 47.000 tonn/ári. Samhliða þessum áfanga eykst niðurdæling brennisteinsvetnis úr 5.000 tonn/ári í 11.000 tonn/ári. Gert er ráð fyrir að Orka náttúrunnar hefji gangsetningu nýrrar hreinsistöðvar í árslok 2024. Ekki er gert ráð fyrir nýjum niðurdælingar- eða vöktunarholum fyrir fullhreinsun Helligshólavirkjunar, en niðurdæling og vöktun verður áfram í sömu holur og verið hefur til þessa.

Borsvæði	Geymslugeymir	Magn tonn/ári (allt að)	Nýjar niðurdælingarholur	Nýjar vöktunarholur
Húsmúli	Djúpkerfi	47.000	0	0
Alls		47.000	0	0

Þriðji áfangi – Niðurdæling á CO₂ frá nýjum aðilum í millikerfi; frá nýrri starfsemi á athafnasvæði ON, úr andrúmslofti eða flutt á staðinn til niðurdælingar.

Í þriðja áfanga er gert ráð fyrir gangsetningu verkefna á geymslusvæði Carbfix vegna niðurdælingar frá nýjum aðilum í millikerfi; frá nýrri starfsemi á athafnasvæði ON, úr andrúmslofti eða flutt á staðinn til niðurdælingar. Gert er ráð fyrir að um eitt eða nokkur verkefni sé að ræða og að gangsetning þeirra hefjist í áföngum frá og með árinu 2025 og að fullum afköstum niðurdælingar

CO₂, allt að 300.000 tonn/ári, verði náð í kringum 2030. Áform þessi byggja á því að nýir aðilar ljúki við málsmeðferð sinnar framkvæmdar og hafi aflað tilskilinna leyfa áður en til samstarfs við Carbfix um niðurdælingu CO₂ kemur. Fjallað er nánar um mögulegar tengdar framkvæmdir nýrra aðila í kafla 6.3.

Gert er ráð fyrir allt að 18 nýjum niðurdælingarholum í tengslum við þriðja áfanga. Til greina kemur að bora þær allar í Jarðhitagarði, en einnig á öðrum borsvæðum Carbfix, þó að hámarki tvær í Húsmúla og í Sleggjubeinsdal, eina í Þrengslum og átta við Gráuhnúka. Þá er gert ráð fyrir sjö nýjum vöktunarholum, en staðsetning þeirra ræðst alfarið af staðsetningu niðurdælingarhola. Þær verða að hámarki fjórar í Jarðhitagarði, ein í Sleggjubeinsdal og tvær við Gráuhnúka.

Borsvæði	Geymslugeymir	Magn tonn/ári (allt að)	Nýjar niðurdælingarholur (allt að)	Nýjar vöktunarholur (allt að)
Jarðhitagarður	Millikerfi	300.000	18	3
Húsmúli	Millikerfi	50.000	2	0
Þrengsli	Millikerfi	29.000	1	0
Sleggjubeinsdalur	Millikerfi	50.000	2	1
Gráuhnúkar	Millikerfi	200.000	8	2
Alls*		300.000	18	6

*Samtala nýrra niðurdælingarhola fer ekki yfir 18 í þriðja áfanga og nýrra vöktunarhola ekki yfir 6, en dreifing þeirra getur verið með ólíkum hætti líkt og sjá má í töflu. Þá fer samtala niðurdælingarholna ekki yfir 300.000 tonn/ári í heildina fyrir 3. áfanga.

Á þessu stigi eru ekki fyrir hendi forsendur fyrir nánari skiptingu í þriðja áfanga. Líkt og með niðurdælingarverkefni Carbfix fram til þessa og verkefni sem eru fyrirhuguð í fyrsta og öðrum áfanga, þá verður niðurdæling ávallt aukin í skrefum. Sem dæmi má nefna að Climeworks gerir ráð fyrir að auka föngun CO₂ úr andrúmslofti í lofthreinsiverum sínum á Hellisheiði úr 4.000 tonn/ári árið 2021 í allt að 44.000 tonn/ári árið 2024. Þá gerir Orka náttúrunnar ráð fyrir að auka föngun CO₂ úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar í hreinsistöðvum sínum úr 12.000 tonn/ári frá 2016 í allt að 47.000 tonn/ári með nýju hreinsistöðinni árið 2025.

5.7 Frágangur og niðurrið

Líkt og fram kemur í lýsingu á framkvæmd hér að ofan verða nýjar niðurdælingarholur ásamt stjórnbyggingum ýmist staðsettar á þegar röskuðum borsvæðum eða innan lóðarmarka samstarfsaðila í Jarðhitagarði (sjá mynd 5.1). Gera má ráð fyrir að rask vegna nýrra stjórnbygginga geti orðið allt að 400 m². Gera þarf borstæði (u.þ.b. 25x45 m) fyrir nýjar niðurdælingarholur innan Jarðhitagarðs. Í flestum tilfellum er gert er ráð fyrir fleirum en einni borholu á lóð og er þá gert ráð fyrir að samnýta borstæði. Þannig er rask vegna tveggja samliggjandi hola nær 1.700 m² en 2.250 m². Reikna má með að rask vegna nýrra niðurdælingarhola verði allt að 22.000 m² fyrir allt að 22 niðurdælingarholur meðan á framkvæmdum stendur.

Nýjar vöktunarholur eru ýmist á þegar röskuðum borsvæðum, innan lóðarmarka samstarfsaðila Jarðhitagarðs eða á mörkum núverandi iðnaðarsvæðis eins og það er skilgreint í aðalskipulagi Sveitarfélagsins Ölfuss (sjá mynd 5.1). Gera þarf lítið borstæði (u.þ.b. 16x25 m) fyrir vöktunarholur í Jarðhitagarði og á mörkum iðnaðarsvæðis (alls þrjár) og má gera ráð fyrir að rask vegna þeirra

verði allt að 1.200 m² fyrir þær þrjár holur. Þar sem gert er ráð fyrir lögnum innan núverandi lagnabeltis er talið að óverulegt rask verði af lagnagerð.

Í heildina má því reikna með að rask vegna nýrra mannvirkja á geymslusvæði Carbfix verði allt að 24.000 m² á framkvæmdatíma. Í lok framkvæmda verður gengið frá framkvæmdasvæðinu eins og best verður á kosið þannig að mannvirki falli eins vel að umhverfi og mögulegt er. Frágangur umhverfis borholur til niðurdælingar verður með líkum hætti og öðrum borunum á vegum OR og félaga á Hellisheiði. Frá 2012 hefur verið þróuð aðferðafræði við frágang svæða eftir framkvæmdir, sem kennd er við „Hellisheiðarfrágang“. Aðferðafræðin hefur verið í stöðugri þróun og hefur gefið góða raun á Hengilssvæðinu og víðar. Hér að neðan er gerð grein fyrir í hverju Hellisheiðarfrágangur felst.

Stefnt er að því að takmarka stærð borstæða eins og hægt er og laga að landslagi. Gert er ráð fyrir að ganga frá borstæðum með gróðurtorfum sem varðveittar verða af framkvæmdasvæðinu, sem og fræslægju. Þar sem við á verður notast við grjót og annan efnivið sem fyrir er á svæðinu til að laga svæðið að landslaginu í kring.

Frágangur með gróðurtorfum. Þar sem yfirborði er raskað eru gróðurtorfur ristar upp og haldið til haga og þær nýttar til að ganga frá svæðinu að framkvæmdum loknum. Gróðurtorfur sem nýttast ekki eru geymdar og nýttar í frágang og landgræðslu á nálægum framkvæmdasvæðum eins og verið hefur. **Mynd 5.5** hér að neðan sýnir ásýnd framkvæmdasvæðis fyrir (mynd t.v.) og eftir (mynd t.h.) frágang með gróðurtorfum.



Mynd 5.5: Dæmi um frágang framkvæmdasvæðis og árangur landgræðslu. Fyrir (t.v.) og eftir (t.h.).

Frágangur með staðbundnu efnisvali. **Mynd 5.6** hér að neðan sýnir ásýnd borstæðis og slóða sem að því liggur fyrir (mynd t.v.) og eftir (mynd t.h.) frágang með staðbundnu grjóti sem flutt var til, til að laga borstæðið að landslaginu í kring. Því næst var gróðurtorfum af framkvæmdasvæðinu og mosa sem blandað hefur verið í súrmjólk dreift á svæðið. Innan skamms má lítinn mun sjá á uppgræðslusvæðinu og náttúrulegum svæðum í kring.



Mynd 5.6: Dæmi um frágang og aðlögun borstæðis að umhverfi og árangur uppgræðslu. Fyrir (t.v.) og eftir (t.h.).

Frágangur með fræslægju. Við frágang á framkvæmdasvæðum er aldrei notast við grasfræ, nema um sé að ræða innlendar einærar tegundir. Þess í stað er slegin svokölluð fræslægja sem dreift er á framkvæmdasvæðið. Innan skamms tíma verður gróðurframvinda með sama hætti og á óróskuðum svæðum í kring. **Mynd 5.7** hér að neðan sýnir ásýnd framkvæmdasvæðis fyrir (mynd t.v.) og eftir (mynd t.h.) frágang með fræslægju.



Mynd 5.7: Dæmi um ásýnd framkvæmdasvæðis fyrir (t.v.) og eftir (t.h.) frágang með fræslægju.

Líkt og að framan greinir er í flestum tilfellum gert ráð fyrir að borholur verði á lóðum þriðja aðila sem Carbfix dælir niður CO₂ frá í Jarðhitagarði. Frágangur borhola mun því fara saman með öðrum frágangi á lóðum þriðja aðila þegar það á við, en frágangur á öðrum mögulegum svæðum, svo sem Þrengslum, við Gráuhnúka og í Sleggjubainsdal verður með þeim hætti sem hér er lýst að ofan.

Carbfix mun leggja lagnir frá niðurdælingarkerfi að holutoppi niðurdælingarholu þar sem við á. Frágangur á niðurgröfnum niðurdælingarlögnum Carbfix verður með þeim hætti er lýst hér að ofan á frágangi með gróðurtorfum (**mynd 5.5**). Frágangur þessi er í samræmi við núverandi aðferð við frágang lagna á Hellisheiði, þar sem gróðurtorfur eru ristar ofan af lagnastæðinu og lagðar aftur ofan á skurðinn að framkvæmdum loknum. Innan skamms tíma er erfitt að greina milli lagnastæðis og umhverfisins í kring.

Eftir líftíma fyrirhugaðs geymslusvæðis verður tekin ákvörðun um áframhald niðurdælingar eða niðurrif. Mannvirki á vegum Carbfix eru fyrst og fremst borholur, borholuhús og vatnslagnir að þeim, þar sem við á. Niðurrif mannvirkja takmarkast því við að fjarlægja þann búnað sem Carbfix nýtir til niðurdælingar. Hönnun borhola til niðurdælingar er þannig að holutoppsbúnaður stendur á steiptum sökkli á borteig með borholuhúsi. Lagnir að niðurdælingarkerfi eru teknar neðanjarðar í gegnum sökkul. Niðurrif þessara mannvirkja felur í sér að fjarlægja borholuhús sem sett er yfir búnað til að skýla honum. Því næst er hægt að fjarlægja allan yfirborðsbúnað þannig að einungis standi eftir fóðring, flans og lok og landslagið er fært til fyrra horfs með þeim aðferðum er fjallað er um hér á undan. Mögulegt er að fjarlægja vatnslagnir með því að rista gróðurtorfum ofan af lagnastæðinu og leggja þær svo aftur ofan á skurðinn þegar lagnir hafa verið fjarlægðar.

5.8 Lokunarátætlun

Þegar hver og ein niðurdælingarhola er tekin úr notkun verður vatni án uppleysts CO₂ dælt á holuna í eina viku eftir að CO₂ er dælt á holuna. Síðan verður þétt lok með hitastigs- og þrýstímæli sett á flans holufóðringar og þá er allur niðurdælingarbúnaður fjarlægður. Möguleiki er á að taka lokið af flansinum fyrir jarðlagamælingar á holu eða til að safna vatnssýnum ef ástæða þykir til í rannsóknaskyni.

Fylgst verður með niðurdælingarsvæði í a.m.k. 20 ár eftir að það verður tekið úr notkun. Vöktun verður hætt þegar öll gögn benda til að CO₂ er eða verði bundið í jarðlögum með annað hvort leysnibindingu eða steindabindingu (sjá kafla 3.3). Til greina kemur að stytta þennan vöktunartíma ef allar mælingar og líkön benda til að a.m.k. 95% af niðurdældu CO₂ hafi bundist í steindum á vöktunartímabilinu.

Vöktun felst í:

- Sýnatöku á vatni úr vöktunarholum í geymslugeyminum.
- Uppfærslu á forðafræðilíkönnum.
- Sýnatöku á vatni úr grunnvatnsholum.
- Mælingum á flæði CO₂ um yfirborð.
- Álestri á toppþrýstingi og hitastigi í aflögðum niðurdælingarholum.
- Sjónrænni skoðun á ástandi búnaðar á yfirborði.

Tíðni vöktunar verður í samræmi vöktunaráætlun, sjá nánari umfjöllun í kafla 13.2.

Lokunaráætlun er lýst nánar í Vöktunaráætlun fyrir niðurdælingu CO₂ á Hellisheiði (**viðauki 4**).¹²

5.9 Leyfisveitingar samstarfsaðila

Niðurdæling Carbfix á CO₂ til geymslu í jarðlögum er ávallt í samstarfi við tiltekinn rekstraraðila sem sér um föngun og, eftir því sem við á, hreinsun á CO₂ og flytur það um lagnir að niðurdælingarholum þar sem Carbfix tekur við því til niðurdælingar í geymslugeymi.

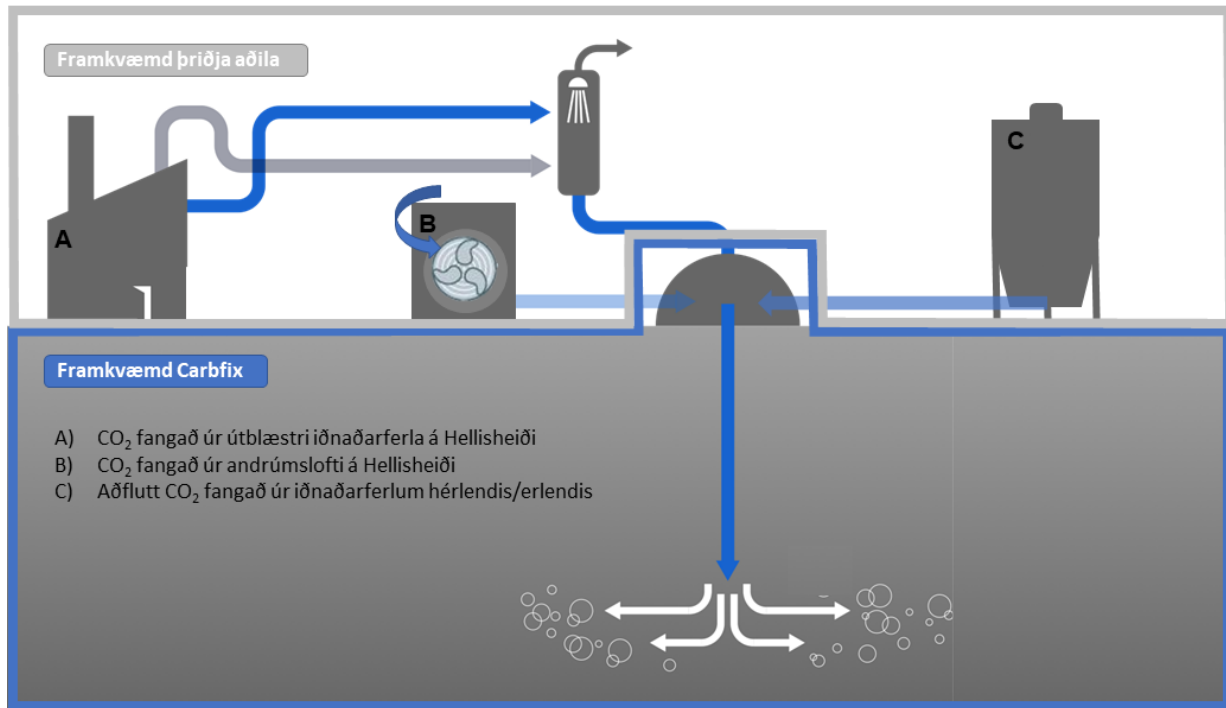
Carbfix mun sækja um starfsleyfi til geymslu á CO₂ í jarðlögum til Umhverfisstofnunar í samræmi við 33. gr. c. laga nr. 7/1998 hollustuhætti og mengunarvarnir og 6. gr. reglugerðar nr. 1430/2022 um geymslu koldíoxíðs í jörðu, þar sem meðal annars verður sett skilyrði um samsetningu koldíoxíðstraumsins. Með öðrum orðum þá mun Carbfix ekki geta tekið við CO₂ frá þriðja aðila til niðurdælingar sem ekki uppfyllir kröfur um samsetningu koldíoxíðstraums eins og þær eru settar fram í starfsleyfi.

Rekstraraðili sem hyggur á hvers kyns föngun CO₂ og samstarf við Carbfix um niðurdælingu þess til geymslu í jarðlögum er háður því að fyrirhuguð starfsemi hafi fylgt viðeigandi málsmeðferð áður en til samstarfs kemur. Sem dæmi um það eru mannvirki sem hafa þann tilgang að fanga CO₂ til geymslu í jörðu úr andrúmslofti eða frá iðjuverum ávallt í flokki B og í sumum tilfellum í flokki A í 1. viðauka laga nr. 111/2021 um umhverfismat framkvæmda og áætlana. Sama gildir um leiðslur til flutnings CO₂ til geymslu í jörðu. Með öðrum orðum er tryggt að rekstraraðili sem hyggur á samstarf við Carbfix á geymslusvæði á Hellisheiði hafi fengið skorið úr um matsskyldu sinnar framkvæmdar, eða jafnvel farið í umhverfismat áður en til niðurdælingar kemur.

Af ofangreindu má sjá að það liggur fyrir skýr verkaskipting milli Carbfix sem rekstraraðila geymslusvæðis annars vegar og þriðja aðila sem fangar, hreinsar og flytur CO₂ að niðurdælingarholum Carbfix hins vegar. Þessari verkaskiptingu er nánar lýst á **mynd 5.8**. Framkvæmdalýsing hér að neðan tekur til framkvæmdar Carbfix á geymslusvæði sem er í umhverfismati, en að auki er fjallað um tengdar framkvæmdir um föngun og flutning CO₂ á vegum þriðja aðila í kafla 6.

¹² Martin Voight, 2022.

Ný hreinsistöð við Hellisheiðarvirkjun¹³ hefur fengið skorið úr um matsskyldu þeirrar framkvæmdar, en hún er ekki háð umhverfismati. Orca og Mammoth lofthreinsiver Climeworks féllu ekki undir lög um umhverfismat framkvæmda og áætla á sínum tíma.



Mynd 5.8: Verkaskipting Carbfix sem rekstraraðila geymslusvæðis og þriðja aðila. Carbfix tekur við CO₂ sem fangað er af þriðja aðila við niðurdælingarholu. Rekstraraðili sem hyggur á föngun CO₂ til niðurdælingar á geymslusvæði Carbfix þarf að ljúka viðeigandi málsmeðferð fyrir sína framkvæmd áður en til samstarfs kemur. CO₂ fangað úr andrúmslofti (B) getur hvort sem er verið sent á gasformi í niðurdælingarholu líkt og sýnt er á mynd eða uppleyst í vatni.

¹³ <https://www.skipulag.is/media/attachments/Umhverfismat/1797/202112068%20-%20Hreinsist%C3%B6%C3%B0%20vi%C3%B0%20Hellishei%C3%B0arvirkjun.pdf>

6 Upplýsingar um tengdar framkvæmdir

Líkt og fjallað er um í kafla 5 um framkvæmdaáform Carbfix er niðurdæling Carbfix á CO₂ ávallt í samstarfi við tiltekinn rekstraraðila sem sér um föngun og, eftir því sem við á, hreinsun á CO₂ og flytur það um lagnir að niðurdælingarholum þar sem Carbfix tekur við CO₂ til niðurdælingar til geymslu í jarðlögum.

Rekstraraðili sem hyggur á hvers kyns föngun CO₂ og samstarf við Carbfix um niðurdælingu þess til geymslu er háður því að fyrirhuguð starfsemi hafi fylgt viðeigandi málsmeðferð áður en til samstarfs kemur. Sem dæmi eru mannvirki sem hafa þann tilgang að fanga CO₂ til geymslu í jörðu úr andrúmslofti eða frá iðjuverum ávallt í flokki B og í sumum tilfellum í flokki A í 1. viðauka laga nr. 111/2021 um umhverfismat framkvæmda og áætlana. Sama gildir um leiðslur til flutnings CO₂ til geymslu í jörðu. Forsenda niðurdælingar CO₂ frá þriðja aðila sem á Hellisheiði er að Carbfix geti tekið við efnastrumnum eins og hann verður skilgreindur í starfsleyfi geymslusvæðis.

Hér að neðan er gerð grein fyrir tengdum framkvæmdum, bæði þeim sem þegar hafa verið ákveðnar en einnig mögulegum framkvæmdum frá nýjum aðilum að því marki sem það er gerlegt.

6.1 Föngun CO₂ úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar

ON rekur Hellisheiðarvirkjun sem gangsett var í áföngum frá árinu 2006. Starfsemi Hellisheiðarvirkjunar fylgir losun jarðhitagastegunda, þá helst CO₂ og H₂S. Árið 2014 var gangsett hreinsistöð við virkjunina til þess að fanga og farga H₂S og CO₂ úr útblæstri virkjunarinnar og hreinsar hún nú sem nemur 75% af H₂S og um 30% af CO₂ úr vinnslurás virkjunarinnar. Þróun og uppsetning hreinsistöðvar á Hellisheiði var ekki síst til að bregðast við reglugerð 514/2010 um styrk brennisteinsvetnis í andrúmslofti.

ON áformar nú að reisa nýja og afkastameiri hreinsistöð við Hellisheiðarvirkjun með það að markmiði að fanga og farga um 95% af CO₂ úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar. Samhliða því mun nær allt H₂S frá virkjuninni verða fangað og því fargað. Hellisheiðarvirkjun verður nær sporlaus hvað útblástur varðar, sú fyrsta sinnar tegundar á heimsvísu. Hreinsistöðin verður staðsett við hlið núverandi hreinsistöðvar á byggingarreit Hellisheiðarvirkjunar. Notaðar verða sömu niðurdælingarholur og verið hefur og verða lagnir lagðar í jörðu samhliða þeim lögnum sem fyrir eru. Föngun jarðhitalofttegunda felur í sér þvott á jarðhitagasi með vatni svo engin utanaðkomandi efni eru notuð í ferlinu. ON er framkvæmdaraðili að föngun CO₂ og H₂S úr vinnslurás Hellisheiðarvirkjunar en niðurdæling verður í höndum Carbfix. Framkvæmdin við nýju hreinsistöðina fellur í flokk B samkvæmt 1. viðauka laga nr. 111/2021 um umhverfismat framkvæmda og áætlana. ON sendi fyrirsöfnun um matsskyldu framkvæmdarinnar til Skipulagsstofnunar í desember 2021 og 11. mars 2022 lá ákvörðun Skipulagsstofnunar fyrir um að framkvæmdin skyldi ekki háð mati á umhverfisáhrifum. Unnið er að umsókn um starfsleyfi hreinsistöðvar í samræmi við tl. 6.9 í 1. viðauka laga nr. 7/1998 og var umsókn send umhverfisstofnun til afgreiðslu 30. júní 2022. Auk nýju hreinsistöðvarinnar er ráðgert að reka áfram núverandi hreinsistöð á um það bil 50% afköstum. Samanlagt munu þær tvær afkasta um það bil 47.000 tonn/ári af CO₂ og 11.000 tonn/ári af H₂S í fullum rekstri, eða sem nemur um það bil öllu CO₂ sem Hellisheiðarvirkjun losar ásamt öllu H₂S sem virkjunin losar.

6.2 Föngun CO₂ úr andrúmslofti í Jarðhitagarði ON

6.2.1 Orca

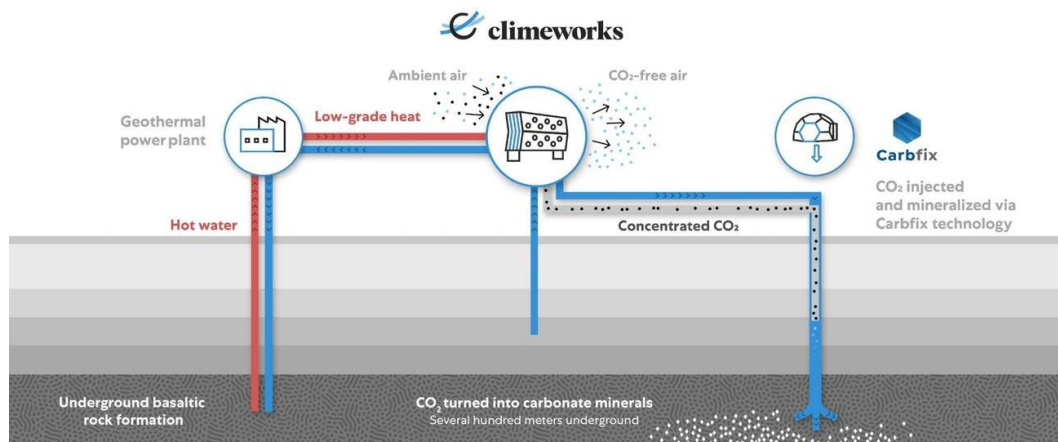
Svissneska tæknifyrirtækið Climeworks hefur frá árinu 2017 unnið að rannsóknum og þróun á loftsgutækni sinni í samstarfi við Orkuveitu Reykjavíkur, Orku náttúrunnar og nú síðast Carbfix en tæknin sjálf hefur verið í þróun síðan 2009. Í upphafi var samstarfið styrkt af Rammaáætlun Evrópusambandsins, Horizon 2020, og fólst í að setja upp loftsugu í Tæknigörðum ON á Hellisheiði. Loftsugan var tengd við rafmagn og heitt skiljuvatn frá virkjuninni og CO₂ sem fangað var úr andrúmsloftinu var síðan sent til niðurdælingar ásamt CO₂ sem var upprunnið í djúpkerfinu. Þessi prófun veitti þátttakendum dýrmæta reynslu sem nýtt var við hönnun á uppskölun tækninnar og var nýtt loftheinsiver, Orca, með átta loftsugum gangsett í Jarðhitagarði í september 2021. Hver loftsuga afkastar um það bil 500 tonn/ári. Loftsugunum er raðað umhverfis stjórnbyggingu þar sem allur stjórnbúnaður starfseminnar er hýstur. Byggingarmagn Orca er 763 m², sjá **mynd 6.1**. Frá Orca liggur niðurgrafin gaslögn að niðurdælingarholu Carbfix sem staðsett er í Þrengslum. Gaslögnin var lögð í pípustæði meðfram öðrum lögnum sem tengjast starfsemi Hellisheiðarvirkjunar.



Mynd 6.1: Orca, loftheinsiver Climeworks. Mynd fengin af heimasíðu Climeworks.¹⁴

Orca nýtir varma og rafmagn frá Hellisheiðarvirkjun til að fanga CO₂ úr andrúmslofti sem umlykur loftsgurnar. Engin utanaðkomandi efni, utan varma og rafmagns eru nýtt í starfseminni. Loftsgurnar fanga CO₂ í tveimur þrepum. Í fyrra þrepi er loft sogað inn í loftsguna með viftu. Þar er koldíoxíð fangað með afar valvísu síum. Þegar sían hefur fyllst lokast fyrir loftsguna og hitinn í loftsgunni hækkaður upp í 80-100 °C sem losar koldíoxíð frá síunum. Að lokum er hreinu koldíoxíð safnað úr loftsgunum og það leitt um gaslögn að borholu Carbfix. Ferli Orca við föngun CO₂ úr andrúmslofti og niðurdælingu þess með tækni Carbfix er sýnt á **mynd 6.2**. Vistferilsgreining sem Climeworks fékk óháðan aðila til að gera leiddi í ljós að losun frá loftsgum Climeworks er innan við 10% eða með öðrum orðum að fyrir hver 100 tonn af CO₂ sem fönguð eru úr andrúmslofti eru um 90% fjarlægð varanlega, en 10% endurlosuð.

¹⁴<https://climeworks.com/roadmap/orca>



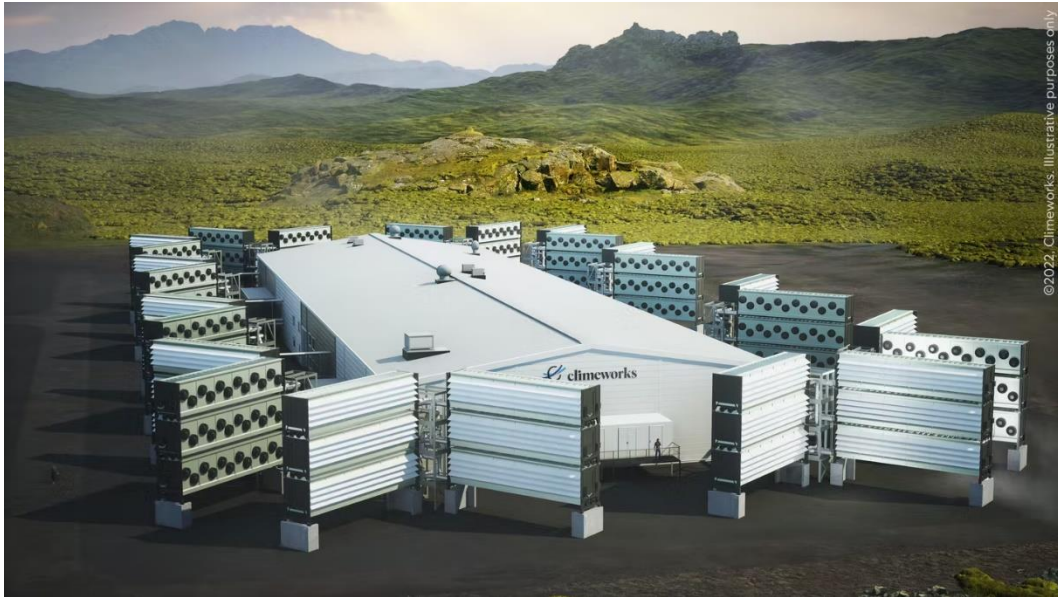
Mynd 6.2: Skýringarmynd af ferli Orca við föngun CO₂ úr andrúmslofti og niðurdælingu þess með tækni Carbfix. Mynd fengin af heimasíðu Climeworks.¹⁵

6.2.2 Mammoth

Climeworks fyrirhugar föngun á allt að 40.000 tonn/ári af CO₂ úr andrúmslofti í Mammoth lofthreinsiverinu sem staðsett verður í Jarðhitagarði. Í lofthreinsiverinu er CO₂ safnað á síur og það síðan sent að þvottaturni við hlið versins. Þar verður CO₂ leyst í vatni og sent í niðurgrafinni lögn sem Climeworks leggur að niðurdælingarkerfi Carbfix sem staðsett verður á sömu lóð. Mammoth lofthreinsiverið mun nýta varma, rafmagn og vatn frá Hellisheiðarvirkjun. Climeworks hefur gert samning við ON um auðlindastrauma sem fyrirtækið nýtir til föngunar CO₂. Climeworks mun nýta allt að 92 L/s af grunnvatni við föngun á CO₂ í þvottaturni. Verður það meðal annars fengið með því að endurnýta vatn frá kæliturnum 5-6 í Sleggju, eða allt að 90 L/s. Vatn frá kæliturnum er í dag skilað í grunnar niðurdælingarholur skammt frá kæliturnum. Einnig verður vatn úr kæliturni Mammoth nýtt við niðurdælinguna en þetta vatn á uppruna sinn í Engidalskvísl.

Climeworks hefur hafið framkvæmdir í Jarðhitagarði en gert er ráð fyrir að Mammoth hefji starfsemi í ársbyrjun 2024. Starfsemi Mammoth mun samanstanda af vinnslusal, sem hýsir búnað véla, skrifstofur o.þ.h. Þá verður viðhaldssalur sem mun hýsa verkstæði, geymslur o.fl. Samanlagt flatarmál vinnslu- og viðhaldssala eru um 7.100 m² og er hæð þeirra 11 m. Umhverfis vinnslubygginguna verða loftsgugur Mammoth en lögun þeirra og legu má sjá á **mynd 6.3**. Gert er ráð fyrir 24 einingum sem hver um sig er í kringum 36 m² og er því heildarflatarmál loftsguga í kringum 864 m². Þá er gert er ráð fyrir u.þ.b. 73 m² kæliturn og þremur frístandandi gámum á lóðinni. Heildarbyggingarmagn Mammoth er því í kringum 8.100 m² að undanskildum kúluhúsum fyrir niðurdælingarholur Carbfix.

¹⁵ <https://climeworks.com/what-is-direct-air-capture-and-storage>



Mynd 6.3: Mammoth, lofthreinsiver Climeworks. Mynd fengin af heimasíðu Climeworks.¹⁶

6.2.3 Þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsiver

Áformað er að setja upp þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni á Hellisheiði þar sem þriðju aðilar geti komið með tæknilausnir sínar og prófað þær í raunaðstæðum og jafnframt fengið aðgang að rafmagni, vatni og niðurdælingu á því CO₂ sem þau fanga. Um er að ræða minni aðila sem annað hvort verða staðsettir í tæknigörðum ON á lóð Kolviðarhóls við stöðvarhús Hellisheiðarvirkjunar eða á lóðum í Jarðhitagarði, allt eftir stærð hvers aðila. Það er ekki auðvelt að sjá fyrir hvers kyns mannvirki er um að ræða, en vísbendinga má leita í fordæmum Climeworks á Hellisheiði. Sem dæmi byrjaði Climeworks í tæknigörðum ON með eina loftsugu árið 2017 áður en þau færðu sig yfir í Jarðhitagarð með núverandi og fyrirhugaða starfsemi, sjá mynd 6.4. Þriðji aðili sem áformar uppbyggingu lofthreinsivers í tilraunaskyni mun auk mannvirkja er snúa að starfseminni leggja gaslögn, eða vatnslögn fyrir gashlaðið vatn ásamt rafkögnum frá starfsstöð sinni að niðurdælingarkerfi Carbfix.



Mynd 6.4: Loftsuga Climeworks á lóð tæknigarða við Hellisheiðarvirkjun, á tilrauna og þróunar tímabili.

¹⁶ <https://climeworks.com/roadmap/mammoth>

Gert er ráð fyrir að aðilar sem hefja starfsemi í þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni í samstarfi við Carbfix og ON geti í heildina fangað allt að 15.000 tonn/ári af CO₂ og að starfsemi hefjist fyrir árslok 2024.

6.3 Framkvæmdir nýrra aðila

Tækni við föngun CO₂, hvort sem er úr andrúmslofti eða úr hvers kyns útblæstri frá iðnaði, fleygir hratt fram um þessar mundir. Ríkur áhugi er fyrir hendi hjá nýjum aðilum að fara í samstarf við Carbfix um niðurdælingu á CO₂ til geymslu í jarðlögum. Carbfix hefur fundið fyrir gífurlegri eftirspurn eftir slíkum lausnum og því mikilvægt að meta áhrif niðurdælingar CO₂ frá framtíðarverkefnum til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði strax á þessu stigi, þannig að niðurstaða fyrir geymslusvæði liggja fyrir. Carbfix áformar að geta tekið við allt að 300.000 tonn/ári af CO₂ frá nýjum aðilum til niðurdælingar á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði. Föngun nýrra aðila á CO₂ hvort sem er á staðnum eða annars staðar, og flutningur þess á Hellisheiði, er ekki hluti af þessu umhverfismati, öðru en því er snýr að áhrifum niðurdælingar á geymslugeymi og er hluti af framkvæmd Carbfix. Nýr aðili sem hyggur á föngun CO₂ til niðurdælingar á Hellisheiði í samstarfi við Carbfix er sjálfur ábyrgur fyrir viðeigandi málsmeðferð fyrir sína framkvæmd í samræmi við lög nr. 111/2021 um umhverfismat framkvæmda og áætlana, sem og önnur leyfismál eftir því sem við á.

Gera má ráð fyrir að geymsla á 300.000 tonn/ári á geymslusvæði Carbfix komi frá einum eða nokkrum aðilum, sem myndu semja við ON um lóð á athafnasvæði þeirra og aðgengi að auðlindastraumum líkt og Climeworks gerði fyrir sína starfsemi og lýst er í kafla 5 hér að ofan. Aðili sem hyggur á föngun CO₂, hvort sem er á staðnum eða aðfluttu, til geymslu í jarðlögum í samstarfi við Carbfix gæti afhent Carbfix CO₂ uppleyst í vatni eða á gasformi. Hyggist aðili afhenda CO₂ uppleyst í vatni felur framkvæmd hans í sér að leggja niðurgrafna lögn með gashlöðnu vatni og raflagnir að niðurdælingarkerfi Carbfix. Ef CO₂ verður aftur á móti afhent á gasformi felst í tengdri framkvæmd lagning gas-, vatns- og raflagna neðanjarðar að niðurdælingarkerfi Carbfix. Gert er ráð fyrir að aðilar geti nýtt þegar skilgreind lagnabelti frá Jarðhitagarði að niðurdælingarkerfum fyrir nýjar gas-, vatns- og raflagnir.

Föngun CO₂ frá nýjum aðilum gæti til að mynda verið frá nýjum lofthreinsiverum, tengt uppskölun á tækni úr Þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsiver, líkt og tilfellið var með Climeworks. Föngun CO₂ frá nýjum aðilum í Jarðhitagarði ON gæti einnig tengst nýrri starfsemi þar sem CO₂ er fangað úr útblæstri starfseminnar, meðhöndlað og dælt niður með Carbfix tækninni.

Þrátt fyrir mikla framþróun við föngun á CO₂ úr útblæstri frá iðnaði eru ekki ávallt hagfelldar aðstæður til föngunar á CO₂ nálægt iðnaðarverum og má því gera ráð fyrir að fyrirtæki gætu séð hag sinn í því að flytja CO₂ til geymslu í jarðlögum á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði. Framkvæmd föngunar CO₂ úr útblæstri iðnaðar, hvort sem er héraðs eða erlendis felst í að hreinsa CO₂ nægilega úr efnisstraumnum til að Carbfix geti tekið við honum til niðurdælingar. Því næst verður CO₂ flutt á Hellisheiði, til að mynda á fljótandi formi undir þrýstingi í tönkum, annað hvort landleiðina eða í skipum að uppskipunarhöfn í nágrenni Hellisheiðar og þaðan landleiðina að Hellisheiði. Gera má ráð fyrir að CO₂ verði geymt í tönkum á lóð viðkomandi rekstraraðila þar til að niðurdælingu þess kemur. Áður en til niðurdælingar kemur verður CO₂ á vökvaformi leitt í gegnum varmaskipta og þannig færð á gasform. Varmi er einn auðlindastrauma Hellisheiðavirkjunar, en óverulegt magn þarf til starfseminnar. Því næst er CO₂ leitt um gaslögn að niðurdælingarkerfi Carbfix. Mannvirki tengdrar framkvæmdar verða því að líkindum tankar og varmaskiptar auk ef til vill vinnsluþyngingar, ásamt gaslögn frá lóð að niðurdælingarkerfi Carbfix.

Carbfix gerir ráð fyrir að geta dælt niður CO₂ frá nýjum aðilum á lóð viðkomandi á athafnasvæði ON eða á borsvæðum Carbfix í Húsmúla, Seggjubeinsdal, Þrengslum eða við Gráuhnúka, allt eftir

Því hvað hentar best hverju sinni. Gert er ráð fyrir að nýir aðilar geti að mestu samnýtt lagnaskurði fyrir núverandi innviði Hellisheiðarvirkjunar fyrir gaslagnir frá lóðum í Jarðhitagarði að niðurdælingarkerfi Carbfix.

6.4 Vatns- og rafmagnsnotkun

Carbfix ráðgerir að semja við Orku náttúrunnar (ON) um afhendingu á rafmagni og vatni til niðurdælingar. Orkuþörf vegna niðurdælingar CO₂ með Carbfix tækninni er óveruleg, eða í kringum 1-2 MW fyrir öll niðurdælingarverkefni sem fjallað er um í þessu umhverfismati. Vatn er nýtt til að leysa upp CO₂ og tryggja örugga niðurdælingu, en hægt er að nýta vatn af mismunandi uppruna. Til að mynda hefur þéttivatn frá Hellisheiðarvirkjun verið nýtt til niðurdælingar á CO₂ frá hreinsistöð Hellisheiðarvirkjunar í djúpkerfi. Þá hefur grunnvatn og vatn úr djúpri grunnvatnskerfum verið nýtt í verkefnum Carbfix á Hellisheiði. Carbfix ráðgerir að taka við allt að 315.000 tonn/ári af hreinu CO₂ til niðurdælingar í millikerfi, þ.e. allt að 300.000 tonn/áfrá nýjum aðilum og 15.000 tonn/ári frá þróunarmiðstöð í lofthreinsitækni, og að til hennar þurfi allt að 250 L/s af vatni.

Staðsetning vatnsöflunar fyrir niðurdælingarverkefni Carbfix er undir ON komin, en bæði kemur til greina að bora vatnsöflunarholur sérstaklega til verkefnisins og að nýta núverandi vatnsöflunarkosti. Vatnsöflun er tengd framkvæmd á vegum ON sem er jafnframt ábyrgt fyrir að hún hafi hlotið viðeigandi málsmeðferð hvað varðar umhverfismats- og leyfisferli. ON er með nýtingaleyfi fyrir vatnstöku í Engidal fyrir Hellisheiðarvirkjun og mun sækja um nýtingarleyfi fyrir stöðugri upptekt úr borvatnsveitu eða nýjum holum eftir því sem við á. Hér á eftir er gerð grein fyrir uppruna og eiginleikum núverandi vatnsöflunarkosta sem gætu komið til greina í niðurdælingarverkefnum Carbfix, en ákvörðun verður tekin í hverju verkefni fyrir sig:

1. Vatn frá kæliturnum Hellisheiðarvirkjunar
2. Vatnsöflunarholur KH-03 og KH-17 í Sleggjubeinsdal
3. Vatnsöflunarhola HK-24 í Þrengslum, ásamt mögulega nýrri vatnstökuholu á sama svæði
4. Hringrásun úr vöktunarholum úr millikerfi

Tafla 6.1: Vatnsöflunarkostir sem kemur m.a. til greina að semja við ON um afhendingu á.

	Kæliturn 1-4	KH-03	KH-17	HK-24	Ný HN-01	Hring- rásun
Áætlað magn L/s (allt að)	135-165	20	60	4-45	80	45-55

7 Aðferðafræði við umhverfismat

Aðferðafræði við mat á umhverfisáhrifum byggir meðal annars á leiðbeiningum Skipulagsstofnunar frá árinu 2005 um flokkun umhverfispáttá, viðmið, einkenni og vægi umhverfisáhrifa.¹⁷ Í þeim leiðbeiningum eru helstu hugtök umhverfismats skilgreind, meðal annars með það að markmiði að stuðla að samræmdri umfjöllun.

7.1 Viðmið, einkenni og vægi umhverfisáhrifa

Matsferlinu er lýst á myndrænan hátt á **mynd 2.1** í kafla 2.1 hér að framan. Á myndinni má m.a. sjá mismunandi stig málsmeðferðarinnar og lögbundinn kynningar- og athugunartíma í ferlinu.

7.1.1 Viðmið

Til að greina og meta áhrif á umhverfið vegna niðurdælingar CO₂ í geymslugeymi á geymslusvæði Carbfix á Helliheiði, er gerð grein fyrir framkvæmdinni og grunnástandi umhverfisins á og í nágrenni fyrirhugaðs framkvæmdasvæðis. Við mat á áhrifum framkvæmdar á umhverfispætti er stuðst við eftirfarandi viðmið:

- Lög og reglugerðir.
- Gildandi skipulagsáætlanir.
- Önnur stefnumörkun stjórnvalda.
- Fyrirliggjandi gögn.
- Sérfræðiskýrslur.
- Umsagnir og ábendingar sem koma fram við samráð og kynningu.

Í köflum 8 til 11 hér á eftir er gerð nánari grein fyrir þeim viðmiðum sem notuð eru til að meta vægi umhverfisáhrifa fyrir hvern umhverfispátt.

7.1.2 Einkenni umhverfisáhrifa

Einkenni umhverfisáhrifa eru flokkuð á eftirfarandi hátt:

- Bein og óbein áhrif.
- Jákvæð og neikvæð áhrif.
- Varanleg og tímabundin áhrif.
- Afturkræf og óafturkræf áhrif.

Hugtökin eru skilgreind í leiðbeiningum Skipulagsstofnunar og við matið verða þær skilgreiningar hafðar til hliðsjónar, en þær eru eftirfarandi:

Bein áhrif: (e. *direct impact*) Bein áhrif sem gera má ráð fyrir að framkvæmd muni hafa á tiltekna umhverfispætti.

Óbein áhrif: (e. *indirect impact*) Áhrif á umhverfispætti sem ekki eru bein afleiðing framkvæmdar. Áhrifin geta komið fram í tiltekinni fjarlægð í tíma og/eða rúmi og verið afleiðing samspils mismunandi þátta sem þó má rekja til framkvæmdarinnar. Óbeinum áhrifum er einnig hægt að lýsa sem afleiddum áhrifum.

Jákvæð áhrif: (e. *positive impact*) Áhrif framkvæmdar sem talin eru til bóta fyrir umhverfið á beinan eða óbeinan hátt eða auka umfang núverandi áhrifa að því marki að þau séu talin verða til bóta.

¹⁷ Skipulagsstofnun, 2005.

Neikvæð áhrif: (e. negative impact) Áhrif framkvæmdar sem talin eru skerða eða rýra gildi tiltekins eða tiltekinna umhverfisþátta á beinan eða óbeinan hátt eða auka umfang núverandi áhrifa að því marki að þau valda ónæði, óþægindum, heilsutjóni eða auknu raski.

Varanleg áhrif: (e. permanent impact) Áhrif sem talið er að framkvæmd muni hafa til frambúðar á tiltekna umhverfisþætti, þ.e. með tilliti til æviskeiðs núlifandi manna og komandi kynslóða.

Tímabundin áhrif: (e. temporary impact) Áhrif sem talið er að framkvæmd eða áætlun muni hafa tímabundið á tiltekna umhverfisþætti, þ.e. í nokkrar vikur, mánuði eða ár.

Afturkræf áhrif: (e. reversible impact) Áhrif framkvæmdar á tiltekna umhverfisþætti, sem líta má á að séu þess eðlis að áhrifanna hætti að gæta eftir tiltekinn tíma og að raunhæft sé eða unnt að gera ráð fyrir að hægt sé að færa í sama eða svipað horf og áður en kom til framkvæmda. Gera verður ráð fyrir að áhrifin séu afturkræf á a.m.k. tímaskala núlifandi manna en afturkræf áhrif geta einnig verið háð því að ummerki séu fjarlægð innan ákveðins tíma, t.d. ef um er að ræða áhrif á lífríki.

Óafturkræf áhrif: (e. irreversible impact) Áhrif sem í eðli sínu fela í sér að tilteknir umhverfisþættir verða fyrir varanlegri breytingu eða tjóni vegna framkvæmdar sem ekki er raunhæft eða unnt að afturkalla.

7.1.3 Vægi umhverfisáhrifa

Við mat á vægi umhverfisáhrifa er leiðbeiningum Skipulagsstofnunar fylgt eftir að mestu leyti og er skilgreining á vægishugtökum sem notuð er sú sem sjá má í **töflu 7.1**.

Tafla 7.1: Skilgreiningar á vægishugtökum.

Vægi áhrifa	Skýringar
Verulega jákvæð	<ul style="list-style-type: none"> Áhrif framkvæmdar á umhverfisþátt bæta hag mikils fjölda fólks og/eða hafa jákvæð áhrif á umfangsmikið svæði. Breyting eða ávinningur sem hlýst af framkvæmd er oftast varanleg. Áhrifin eru oftast á svæðis-, lands- og/eða heimsvísu en geta einnig verið staðbundin. Áhrifin samræmast ákvæðum laga og reglugerða, almennri stefnumörkun stjórnvalda eða alþjóðasamningum sem Ísland er aðili að.
Talsvert jákvæð	<ul style="list-style-type: none"> Áhrif framkvæmdar á umhverfisþátt taka ekki til umfangsmikils svæðis, en svæðið kann að vera viðkvæmt fyrir breytingum, m.a. vegna náttúrufars og fornminja. Áhrifin geta verið jákvæð fyrir svæðið og/eða geta verið jákvæð fyrir fjölda fólks. Áhrifin geta verið varanleg og í sumum tilfellum afturkræf. Áhrifin geta verið staðbundin, svæðisbundin og/eða á landsvísu. Áhrifin samræmast ákvæðum laga og reglugerða, almennri stefnumörkun stjórnvalda eða alþjóðasamningum sem Ísland er aðili að.
Óveruleg eða engin áhrif	<ul style="list-style-type: none"> Áhrif framkvæmdar á umhverfisþátt eru lítil og taka til lítils afmarkaðs svæðis. Verndargildi umhverfisþátta er óverulegt. Áhrif á fólk eru óveruleg. Áhrifin eru staðbundin og yfirleitt afturkræf. Áhrifin samræmast ákvæðum laga og reglugerða, almennri stefnumörkun stjórnvalda eða alþjóðasamningum sem Ísland er aðili að. Áhrif framkvæmdar á umhverfisþátt eru engin á skilgreindu áhrifasvæði.

Vægi áhrifa	Skýringar
Talsvert neikvæð	<ul style="list-style-type: none"> Áhrif framkvæmdar á umhverfisþátt taka ekki til umfangsmikils svæðis, en svæðið kann að vera viðkvæmt fyrir breytingum, m.a. vegna náttúruvafars og fornminja. Áhrifin geta verið neikvæð fyrir svæðið og/eða geta valdið fjölda fólks ónæði eða óþægindum. Áhrifin geta verið varanleg og í sumum tilfellum óafturkræf. Áhrifin geta verið staðbundin, svæðisbundin og/eða á landsvísu. Áhrifin geta að einhverju leyti verið í ósamræmi við ákvæði laga og reglugerða, almenna stefnumörkun stjórnvalda eða alþjóðasamninga sem Ísland er aðili að.
Verulega neikvæð	<ul style="list-style-type: none"> Áhrif framkvæmdar á umhverfisþátt skerða umfangsmikið svæði og/eða svæði sem er viðkvæmt fyrir breytingum, m.a. vegna náttúruvafars og fornminja, og/eða rýra hag mikils fjölda fólks. Breyting eða tjón sem hlýst af framkvæmdinni er oftast varanleg og yfirleitt óafturkræf. Áhrifin eru oftast á svæðis-, lands- og/eða heimsvísu en geta einnig verið staðbundin. Áhrifin eru í ósamræmi við ákvæði laga og reglugerða, almenna stefnumörkun stjórnvalda eða alþjóðasamninga sem Ísland er aðili að.
Óvissa	<ul style="list-style-type: none"> Ekki er vitað um eðli eða umfang umhverfisáhrifa á tiltekna umhverfisþætti, meðal annars vegna skorts á upplýsingum, tæknilegra annmarka eða skorts á þekkingu. Það getur verið unnt að afla upplýsinga um áhrifin með frekari rannsóknnum eða markvissri vöktun.

7.2 Athugasvæði og áhrifasvæði framkvæmdar

7.2.1 Staðhættir á framkvæmdasvæði

Framkvæmdasvæðið sem hér um ræðir einkennist af því að þar er starfrækt jarðhitavirkjun Orku náttúrunnar (ON) og mannvirki henni tengd ásamt Jarðhitagarði. Í nágrenninu liggja háspennulínur, ljósleiðari og jarðstrengir. Auk mannvirkja við stöðvarhús virkjunarinnar má nefna efnistökusvæði, borholur, skiljustöðvar, safnæðar og aðveituæðar Helligshéiðarvirkjunar. Á framkvæmdasvæði Helligshéiðarvirkjunar eru nú þegar 63 vinnsluholur og 18 niðurdælingarholur, auk þess sem virkjuninni fylgja samtals um 50 km af lögnum.

Nýsköpunarstarfsemi í tengslum við Helligshéiðarvirkjun er starfrækt í tæknigörðum, sem staðsettir eru rétt austan við virkjunina sjálfa, og í Jarðhitagarði. Í Jarðhitagarði, sem er vestan við Kolviðarhóls reit, er gert ráð fyrir fjölbreyttri starfsemi sem miðar m.a. að því að fullnýta auðlindastrauma Helligshéiðarvirkjunar en þar fer fram starfsemi Vaxa og Orca lofthreinsivers Climeworks sem fangar CO₂ úr andrúmslofti til niðurdælingar á vegum Carbfix.

Helligshéiðarvirkjun er staðsett á Hengilssvæðinu í miðju vestra gosbeltinu, sem nær frá Reykjanesi og norður í Langjökul. Landslag er mótað af gosmyndunum. Móberg sem myndast hefur undir jökli á síðustu jökulskeiðum ísaldar er uppistaðan í berggrunnum en á jöðrum svæðisins umkringja nútíma hraunbreiður móbergið á láglandari svæðum. Hengilssvæðið er meðal stærstu háhitasvæða á Íslandi.

Í umhverfismatsskýrslum fyrir Helligshéiðarvirkjun og stækkun virkjunarinnar er gerð grein fyrir náttúruvafari á svæðinu. Samkvæmt því sem þar kemur fram, er gróðurfar á iðnaðarsvæðinu fremur

fábreytt. Það einkennist að mestu leyti af graslendi og mosabembu ásamt grösnum og smárunnum. Votlendissvæði finnast á stöku stað. Ekkert þessara gróðurlenda getur talist sjaldgæft, hvorki á lands- né svæðisvísu. Flestar fuglategundir sem greinst hafa í rannsóknum á fuglum á Hellisheiði og Hengillssvæði eru algengar víða um land og er þéttleiki þeirra lítill.^{18,19}

Á virkjunarsvæðinu á Hellisheiði er lítið um vatn á yfirborði. Lækur er í Sleggjubeinsdal, en hann hverfur niður í hraun er neðar dregur. Farvegur lækjarins liggur um framkvæmdasvæði Hellisheiðarvirkjunar en honum hefur verið fundinn nýr farvegur austan og sunnan stöðvarhússins.

Skráðar hafa verið fornleifar á svæðinu og eru þær merktar inn á skipulag. Fyrirhuguð framkvæmd sem verður á þegar röskuðum svæðum kemur ekki til með að raska fornleifum.

7.2.2 Áhrifasvæði framkvæmdar

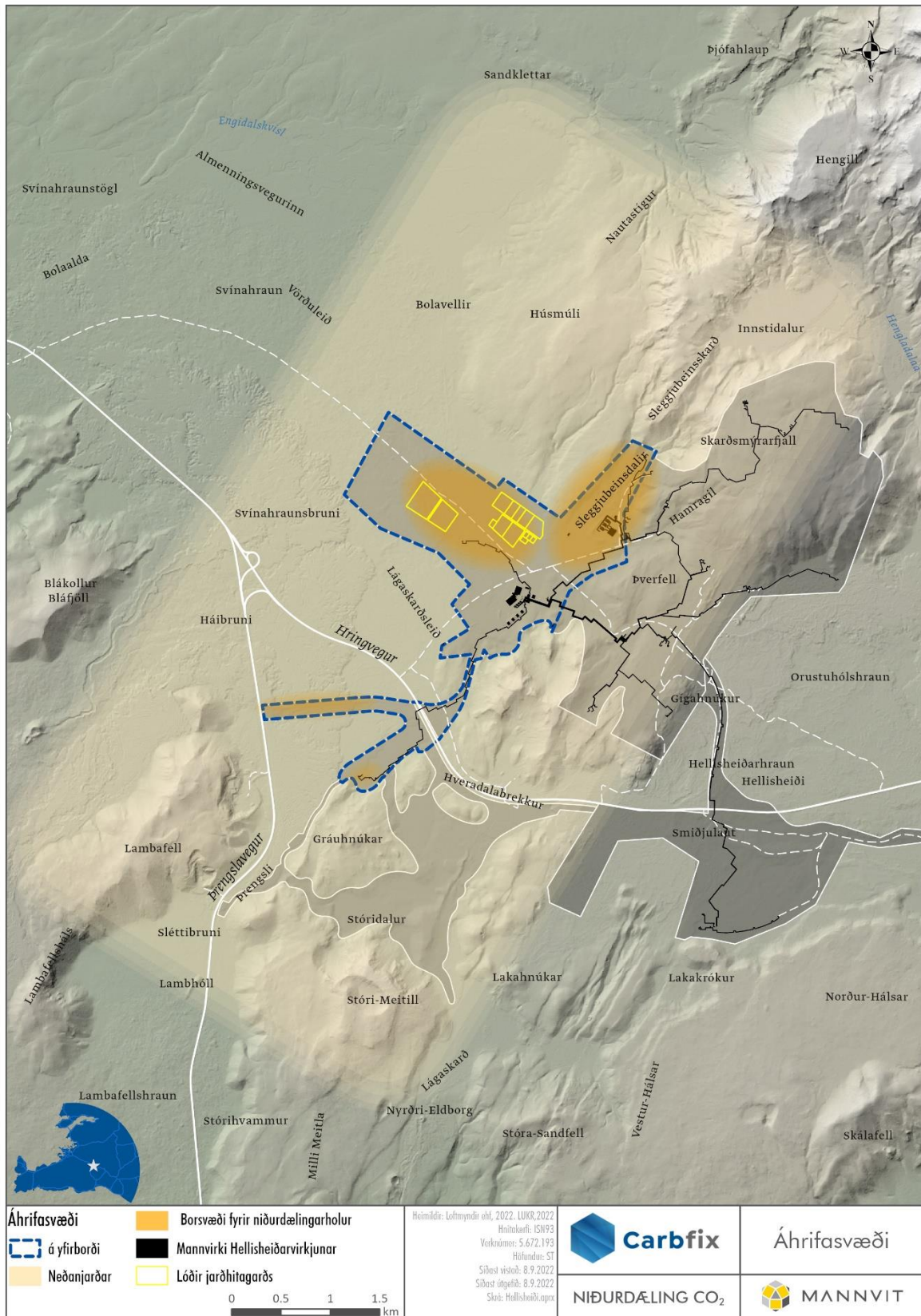
Áhrifasvæði á yfirborði þar sem mannvirki og starfsemi vegna niðurdælingar CO₂ á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði verða staðsett, á vesturhluta iðnaðarsvæðisins á Hellisheiði, afmarkast af borsvæðum í Jarðhitagarði, við Húsmúla, í Sleggjubeinsdal, í Þrengslum og við Gráuhnúka. Alls er áhrifasvæðið um 4 km² að stærð eins og sýnt er á mynd 7.1. Gert er ráð fyrir að öll starfsemi á yfirborði sem tengist fyrirhuguðum niðurdælingarkerfum verði innan þessa svæðis. Einnig er gert ráð fyrir að allar lagnir sem tengjast niðurdælingarkerfum muni liggja meðfram núverandi lagnaleiðum og í skipulögðum vegstæðum. Bein áhrif vegna fyrirhugaðrar framkvæmdar verða á svæði sem fer undir byggingar, borholur og önnur mannvirki á framkvæmdasvæði geymslusvæðis fyrir CO₂ á Hellisheiði, lagnir fyrir rafmagn, gas og vatn. Greint er frá áætluðu raski vegna framkvæmdar og frágangi á röskuðum svæðum í kafla 5.7 hér að framan. Auk beinna áhrifa, kemur áhrifasvæði fyrirhugaðrar geymslu á CO₂ í jarðlögum á Hellisheiði til með að ná yfir svæði undir yfirborði. Samkvæmt matsáætlun var áætlað að það gæti spannað um 42 km². Þá getur áhrifa á jarðskjálftavirkni tengt niðurdælingu mögulega gætt í talsverðri fjarlægð frá upptökum skjálfta. Gerð er nánari grein fyrir áhrifasvæði niðurdælingar CO₂ á Hellisheiði í umfjöllun um umhverfisáhrif framkvæmdarinnar í köflum 8 til 11 hér á eftir.

7.2.3 Athugunarsvæði vegna umhverfismats

Athugunarsvæði tengt mati á umhverfisáhrifum fyrirhugaðrar framkvæmdar miðast annars vegar við svæði undir mannvirki á yfirborði, sem tengjast geymslusvæði fyrir CO₂ á Hellisheiði og næsta nágrenni. Hins vegar er um að ræða athugunarsvæði undir yfirborði og lengra frá framkvæmdasvæðinu. Þannig ná athuganir vegna umhverfismats áhrifa geymslu CO₂ á geymslugeyminn og áhrifa á jarðskjálftavirkni út fyrir iðnaðarsvæðið á Hellisheiði. Fjallað er um umhverfismat framkvæmdarinnar í köflum 8 til 11 hér á eftir.

¹⁸ Orkuveita Reykjavíkur og Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns, 2003.

¹⁹ Orkuveita Reykjavíkur og Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns, 2005.



Mynd 7.1: Áhrifa- og athugunarsvæði CO₂ niðurdælingar á geymslusvæði Carbfix á Helliheiði.

7.3 Áhrifa- og umhverfispættir

Áhrifaþættir framkvæmdar

Þeir framkvæmdaþættir sem geta haft í för með sér umhverfisáhrif á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði eru eftirfarandi:

Niðurdæling CO₂

Áhrif niðurdælingar verða í borholum og í jarðlögum undir yfirborði. Gert er ráð fyrir að CO₂ verði dælt niður í borholur til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði. CO₂ mun koma frá Hellisheiðarvirkjun, lofthreinsiverum í Jarðhitagarði og CO₂ sem fangað verður af þriðja aðila úr útblæstri frá starfsemi á staðnum, úr andrúmslofti eða flutt á staðinn til niðurdælingar. Carbfix tæknin felst í svokallaðri steindabindingu þar sem CO₂ leystu í vatni er dælt niður í basaltbergglög. Þegar það flæðir út í basaltberggrunninn leysir það málma úr basaltinu sem ganga í efnasamband við CO₂ og falla út sem karbónat steindir.

Niðurdæling vökva í jörðu getur mögulega leitt til örvaðrar jarðskjálftavirkni á áhrifasvæði framkvæmdar þegar CO₂ hlaðið vatn streymir frá niðurdælingarholum út í jarðlög á geymslusvæði Carbfix.

Geymsla CO₂ í jarðlögum

Áhrif geymslu CO₂ sem dælt er í jörðu verða í jarðlögum undir yfirborði, þ.e. í geymslugeyminum. Niðurdæling CO₂ á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði verður annars vegar í djúpkerfi neðan lágviðnámskápu jarðhitakerfisins á Hellisheiði og hins vegar í millikerfi á milli efra grunnvatnskerfis og jarðhitakerfis. Við steindabindingu falla út karbónat steindir í geymslugeyminum sem fylla upp í holur í basaltinu. Carbfix tæknin er talin afar örugg leið til geymslu á CO₂ og engin hættu talin á að gasið leki upp á yfirborðið.

Borholur

Jarðrask verður á framkvæmdatíma við borun nýrra hola. Auk niðurdælingar- og vöktunarhola sem eru fyrirbyggjandi, verða boraðar nýjar holur sem verða nýttar til niðurdælingar CO₂ og vöktunar áhrifa. Gert er ráð fyrir að allt að 22 nýjar borholur á vegum Carbfix verði boraðar í millikerfi, í Jarðhitagarði, Húsmúla, Sleggjubeinsdal, Þrengslum og við Gráuhnúka. Þá er gert ráð fyrir allt að sjö nýjum vöktunarholum.

Byggingar

Jarðrask verður á framkvæmdatíma við uppgröft og vegna byggingar nýrra kúluhúsa sem hýsa niðurdælingar- og vöktunarkerfi og mögulegra stjórnbygginga tengdum niðurdælingaverkefnum á geymslusvæði Carbfix, sem yrðu byggðar í tengslum við viðkomandi framkvæmdir. Á rekstartíma verða þessi mannvirki sýnileg. Um er að ræða kúluhús sem eru 25-30 m² og mögulegar stjórnbyggingar sem verða 50-100 m².

Vatnslagnir og raflagnir.

Jarðrask verður við uppgröft og lagningu nýrra vatns- og gaslagna. Gashlaðið vatn verður leitt í niðurgröfnum lögnum að niðurdælingarholum og gert er ráð fyrir að lagður verði niðurgraffinn rafstrengur að niðurdælingarholum Carbfix. Nýjar lagnir verða meðfram fyrirbyggjandi lagnaleiðum og vegslóðum á svæðinu. Þannig er raski haldið í lágmarki og möguleiki verður á samnýtingu á núverandi innviðum.

Binding CO₂ með steinrenningu

Binding CO₂ og H₂S úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar í jarðlög sem annars verður mögulega losað út í andrúmsloft eða fargað með öðrum hætti. Bindur einnig CO₂ í jarðlög sem fangað er úr andrúmslofti á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði. Jafnframt er gert ráð fyrir bindingu CO₂ sem fangað verður af þriðja aðila úr andrúmslofti eða flutt á staðinn til niðurdælingar. Binding með þessum hætti dregur úr losun CO₂ og H₂S á svæðis-, lands- og heimsvísu.

Umhverfispættir

Í matsáætlun voru skilgreindir þeir umhverfispættir sem talið var líklegt að yrðu fyrir áhrifum vegna fyrirhugaðrar niðurdælingar og geymslu CO₂ í jarðlögum á Hellisheiði. Fjallað er um þessa þætti í köflum 8 til 11 hér á eftir, en þeir eru eftirfarandi:

- Geymslugeymir
- Grunnvatn
- Jarðskjálftavirkni
- Loftslag

Umfang mannvirkja á yfirborði vegna fyrirhugaðrar niðurdælingar og geymslu CO₂ verður takmarkað þar sem þau verða að mestu á þegar röskuðum svæðum á skipulögðu iðnaðarsvæði á Hellisheiði, sem einkennist af því að þar er jarðhitavirkjun og tengd mannvirki í þróun. Ekki er talið að gróður, fuglar, jarðmyndanir, landslag, ásýnd, fornleifar, hljóðvist, samfélag og landnotkun verði fyrir áhrifum. Því er ekki er fjallað um mat á umhverfisáhrifum framkvæmdarinnar á þá umhverfispætti. **Mynd 7.2** sýnir hluta framkvæmdasvæðis fyrirhugaðs CO₂ geymslusvæðis Carbfix á Hellisheiði.



Mynd 7.2: Fyrirhugað framkvæmdasvæði niðurdælingar CO₂ á Hellisheiði.

8 Geymslugeymir

8.1 Matsspurningar

Í mati á áhrifum niðurdælingar CO₂ til geymslu í jarðlögum í geymslugeymi á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði er leitast við að svara eftirfarandi matsspurningum:

- Hvaða þættir eru líklegir til að hafa áhrif á geymslugeyminn í djúpkerfi?
- Hvaða þættir eru líklegir til að hafa áhrif á geymslugeyminn í millikerfi?
 - Verða áhrifin yfir einhverjum viðmiðum?
- Hvaða þættir geta haft áhrif á jarðhitavinnslusvæði eða niðurdælingarsvæði ON á Hellisheiði?
- Hvaða þættir geta haft áhrif á vatnsból ON í Engidal?
- Mun mögulega gæta áhrifa vegna niðurdælingar CO₂ á niðurdælingarsvæði ON?
 - Horft til nálægðar við niðurdælingarholur ON.
- Mun mögulega gæta áhrifa vegna niðurdælingar CO₂ á jarðhitavinnslusvæði ON?
 - Horft til nálægðar við vinnsluholur ON.
- Mun mögulega gæta áhrifa á vatnsból ON vegna niðurdælingar CO₂?
 - Horft til nálægðar við vatnsból ON í Engidal.

8.2 Rannsóknir, fyrirliggjandi gögn og viðmið

Sérfræðiverkefni um grunnástand geymslusvæðisins, forðafræðilíkangerð fyrir millikerfi og djúpkerfi ásamt hugsanlegum breytingum í geymslugeymi sem framkvæmdinni fylgja var unnin af sérfræðingum Carbfix²⁰ í samræmi við samþykka matsáætlun. Samstarf var við sérfræðinga OR og ÍSOR, m.a. varðandi gögn um jarðfræði, jarðskjálfta og eðlis- og efnaeiginleika berggrunn, grunnvatns og jarðhitavökva á svæðinu og gerð þrívíðs jarðfræði- og ummyndunarlíkans fyrir geymslusvæðið.

Gögn og viðmið sem lögð eru til grundvallar mati á áhrifum á geymslugeyminn eru eftirfarandi.

- Thomas Ratouis og Matt Villante, 2022. Model of the Injection of CO₂ at Hellisheiði. Possible Effects of the Proposed CO₂ Injection and Mineral Storage Operations. **Viðauki 1.**
- Egill Árni Guðnason, Þorbjörg Ágústsdóttir, Sveinborg Hlíf Gunnarsdóttir, Iwona Monika Galeczka, Auður Agla Óladóttir, Ásdís Benediktsdóttir og Gunnlaugur M. Einarsson, 2022. Sérfræðiskýrsla fyrir umhverfismat fyrir niðurdælingu CO₂ á Hellisheiði. Grunnástand og hugsanlegar breytingar. ÍSOR. **Viðauki 3**
- Sigrún Tómasdóttir, 2022. Grunnvatn á Hellisheiði. Grunnástand og möguleg áhrif fyrirhugaðrar framkvæmdar Carbfix um geymslu CO₂ í jarðlögum á Hellisheiði. Orkuveita Reykjavíkur. **Viðauki 2.**
- Juerg M. Matter o.fl. 2016, Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science*, 352, 1312-1314.
- Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir o.fl., 2020. Carbon dioxide storage through mineral carbonation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1, 90-102.
- Sigurður Reynir Gíslason o.fl. 2010, Mineral sequestration of carbon dioxide in basalt: A pre-injection overview of the CarbFix project. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 4, 537-545.

²⁰ Ratouis og Villante, 2022.

- Deirdre Clark o.fl. 2020, CarbFix2: CO₂ and H₂S mineralization during 3.5 years of continuous injection into basaltic rocks at more than 250 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 279, 45-66.
- Sandra Ó. Snæbjörnsdóttir o.fl. 2014, CO₂ storage potential of basaltic rocks in Iceland and the oceanic ridges. *Energy Procedia*, 63, 4585-4600.
- Gunnar Gunnarsson o.fl. 2016, Staða niðurdælingarmála á Hellisheiði. Orkuveita Reykjavíkur, skýrsla nr. 2016-013.
- Thomas Ratouis o.fl. 2022, Carbfix 2: A transport model of long-term CO₂ and H₂S injection into basaltic rocks at Hellisheiði, SW-Iceland. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 114, 103586.
- Tilskipun Evrópuþingsins og ráðsins 2009/31/EB um geymslu koltvísýrings í jörðu.
- Lög um hollustuhætti og mengunarvarnir nr. 7/1998.
- Reglugerð um losun frá atvinnurekstri og mengunarvarnaeftirlit nr. 550/2018.

Mat á áhrifum niðurdælingar á geymslugeyminn byggist að miklu leyti á fyrirliggjandi heimildum. Auk framangreindra gagna er yfirlit yfir birtar ritrýndar vísindagreinar á vef Carbfix²¹, en af þeim eru yfir tuttugu greinar sem birtar voru frá 2008 og fjalla beint um niðurdælingu og steinrenningu í millikerfi á Hellisheiði, og um tuttugu greinar frá 2014 sem fjalla beint um niðurdælingu og steinrenningu í djúpkerfinu. Auk þess hafa verið gefnar út skýrslur og lokaritgerðir um efnið. Þá hafa þrívíð jarðfræði- og ummyndunarlíkön og forðafræðilíkön fyrir geymslugeyminn í millikerfi og djúpkerfi og rannsóknir tengdar þeim verið nýtt til að skilgreina geymslugetu svæðisins og spá fyrir um svörun geymslugeymisins.

Uppfært þrívítt forðafræðilíkan fyrir millikerfi og djúpkerfi geymslusvæðisins var gert árið 2022 í tengslum við umhverfismat fyrir niðurdælingu CO₂ á Hellisheiði, byggt á eldri líkönum af svæðinu. Aðferðafræði við gerð forðafræðilíkansins er nánar lýst í **viðauka 1**. Meginástæða þess að nýtt líkan var búið til var til að stækka svæðið sem líkanið nær til svo það nái yfir stærra svæði í nágrenni Hellisheiðavirkjunar þar sem niðurdæling hefur ekki áður átt sér stað (**mynd 8.1**).

Við gerð forðafræðilíkans þarf að taka þrjá lykilþætti með í reikninginn sem hafa áhrif á samspil vökva og bergs og þar með mögulega steinrenningu CO₂.

1. Berg- og steindafræði – hagstæð jarðefnafræðileg samsetning (basískt gosberg > súrt gosberg), mikið af mafískum steindum (ólivín > pýroxen > feldspat).
2. Eðli lektar – Sprungur og lekastrúktúrar auka rennsli niðurdælingarvökvans og þar með aðgang hans að yfirborði basaltsins sem CO₂ hvarfast við, og nægu poru- og sprungurými fyrir myndun karbónatsteinda á borð við kalsít.
3. Ummyndun – síðsteindir sem geta haft áhrif á steinrenningu og lekt (t.d. eru síðsteindir mis-fýsilegar fyrir steinrenningu auk þess sem mikil ummyndun getur minnkað lekt bergs þar sem holrými og sprungur fyllast).

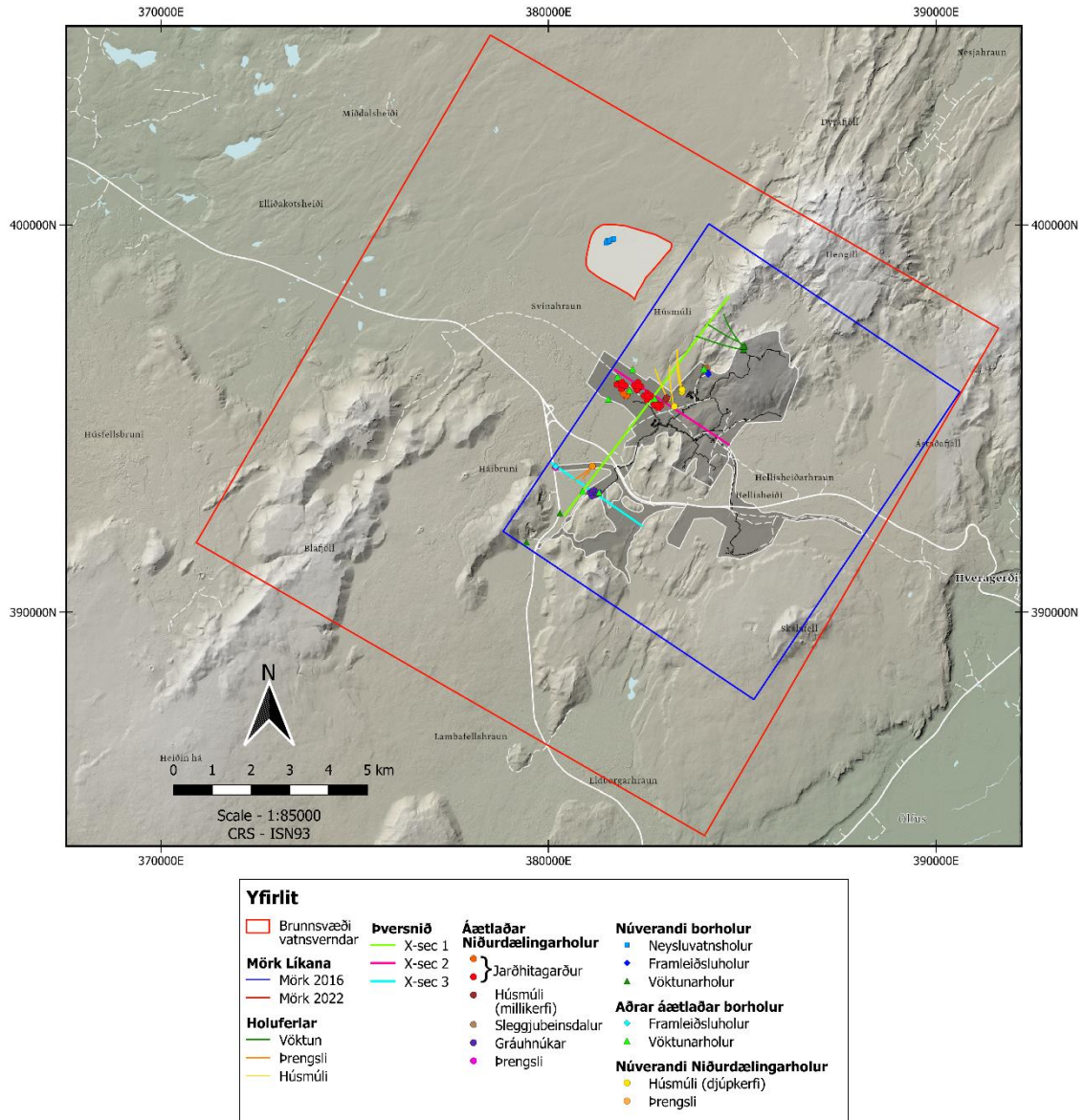
Til þess að það væri mögulegt var jarðfræði- og ummyndunarlíkanið sem forðafræðilíkanið byggir á einnig uppfært. Uppfært jarðfræði- og ummyndunarlíkan, sem var gert árið 2022 í tengslum við umhverfismat fyrir niðurdælingu CO₂ á Hellisheiði, byggir á eldri líkönum frá Hellisheiði og út frá þeim gögnum sem safnað hefur verið frá því að rannsóknir hófust á svæðinu. Líkanið byggir á ítarlegri jarðfræði- og ummyndunargögnum en áður ásamt því að horfa til stærra svæðis. Gagnatúlkun var gerð af sérfræðingum OR, ÍSOR og Carbfix.

²¹ <https://www.carbfix.com/scientific-papers>

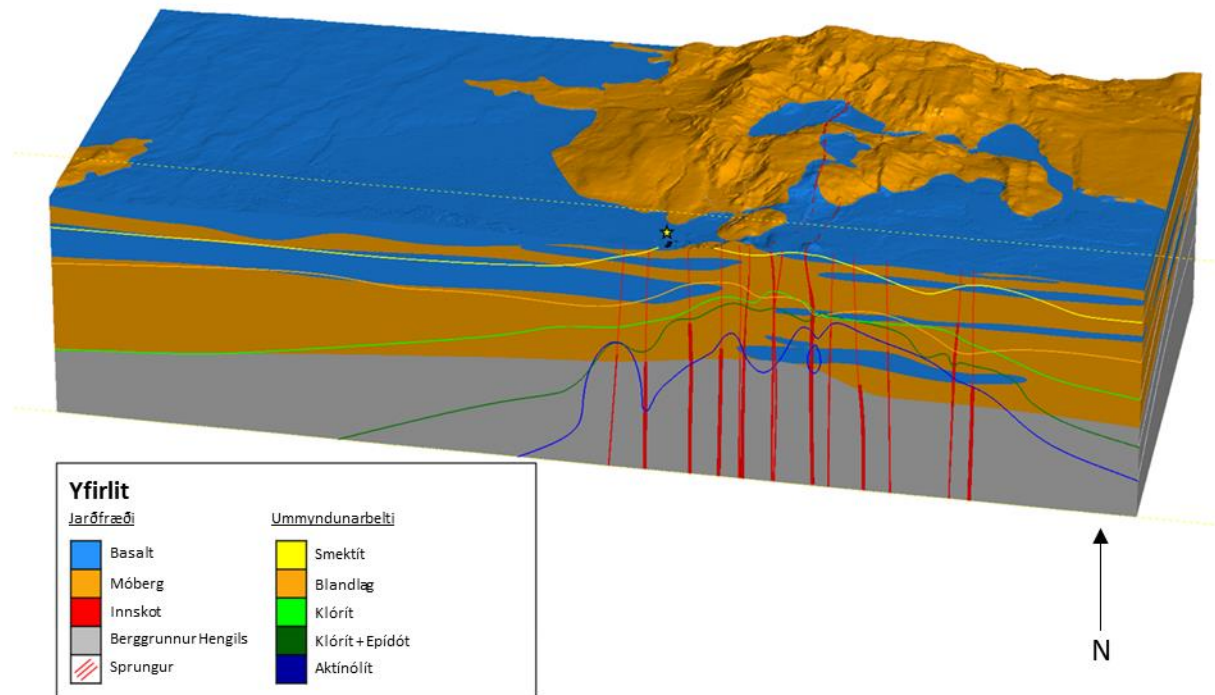
Helstu markmið með uppfærðu jarðfræði- og ummyndunarlíkani eru:

- Að líkanið nái yfir Jarðhitagarð ON, núverandi og fyrirhugaðar vinnslu- og niðurdælingarholur ON, grunnvatnsholur sem gætu orðið fyrir áhrifum, núverandi og nýjar niðurdælingarholur Carbfix ásamt núverandi og nýjum vöktunarholum.
- Að líkanið sýni afstöðu fyrirhugaðra borhola og aukinnar niðurdælingar Carbfix miðað við aðra þætti neðanjarðar, t.d. borhola, misgengja, afmörkunar djúpkerfis og millikerfis geymslusvæðisins o.fl.
- Að líkanið sé uppfært með nýjum gögnum eftir því sem þau verða til og með öðrum fyrirbyggjandi gögnum eftir því sem við á.
- Að líkanið nýtist til að búa til þversnið og myndir til að sýna og miðla upplýsingum um jarðhitakerfið á Hellisheiði og möguleg áhrif aukinnar niðurdælingar CO₂ á svæðinu.
- Að líkanið nýtist sem grunnur að forðafræðilíkani og hermireikningum sem gera kleift að upplýsa vísindafólk, leysisveitendur og hagsmunaaðila um möguleg áhrif aukinnar niðurdælingar CO₂ á Hellisheiði.

Mynd 8.2 sýnir þversnið úr uppfærðu jarðfræði- og ummyndunarlíkani í stefnu NV fyrir helstu jarðfræðilegu þætti þvert á Hellisheiðarvirkjun. Berggrunnurinn á svæðinu er úr basísku gosbergi (basalti), en mismunandi myndunarumhverfi ræður því hvort hraun eða móberg myndist. **Mynd 8.2** sýnir móbergshrúgöld (appelsínugult) á yfirborði umkringd hraunlögum (blátt). Jarðlagaskipan í þversniðinu sýnir hvernig móberg er ráðandi bergtegund allt niður að berggrunni Hengils (grátt). Ummyndunarbeltin eru sýnd sem heilar línur í þversniði sem marka efri mörk þess beltis ásamt því að sýna hvernig dýpi niður á ummyndun eykst með aukinni fjarlægð við sprungusveim Hengils (rauðar línur). Skil milli millikerfis og djúpkerfis eru sýnd með ljósappelsínugulri línu (blandlag). Misgengi sem eru sýnd sem rauðir fletir ná frá berggrunni Hengilsins til yfirborðs. Sverari rauðir fletir tákna innskot sem talin eru tengjast misgengjum og gosmyndunum sem hafa verið kortlögð á yfirborði. Líkt og fyrr segir er jarðfræði- og ummyndunarlíkanið grunnurinn að forðafræðilíkani og hermireikningum fyrir niðurdælingu CO₂ á Hellisheiði.



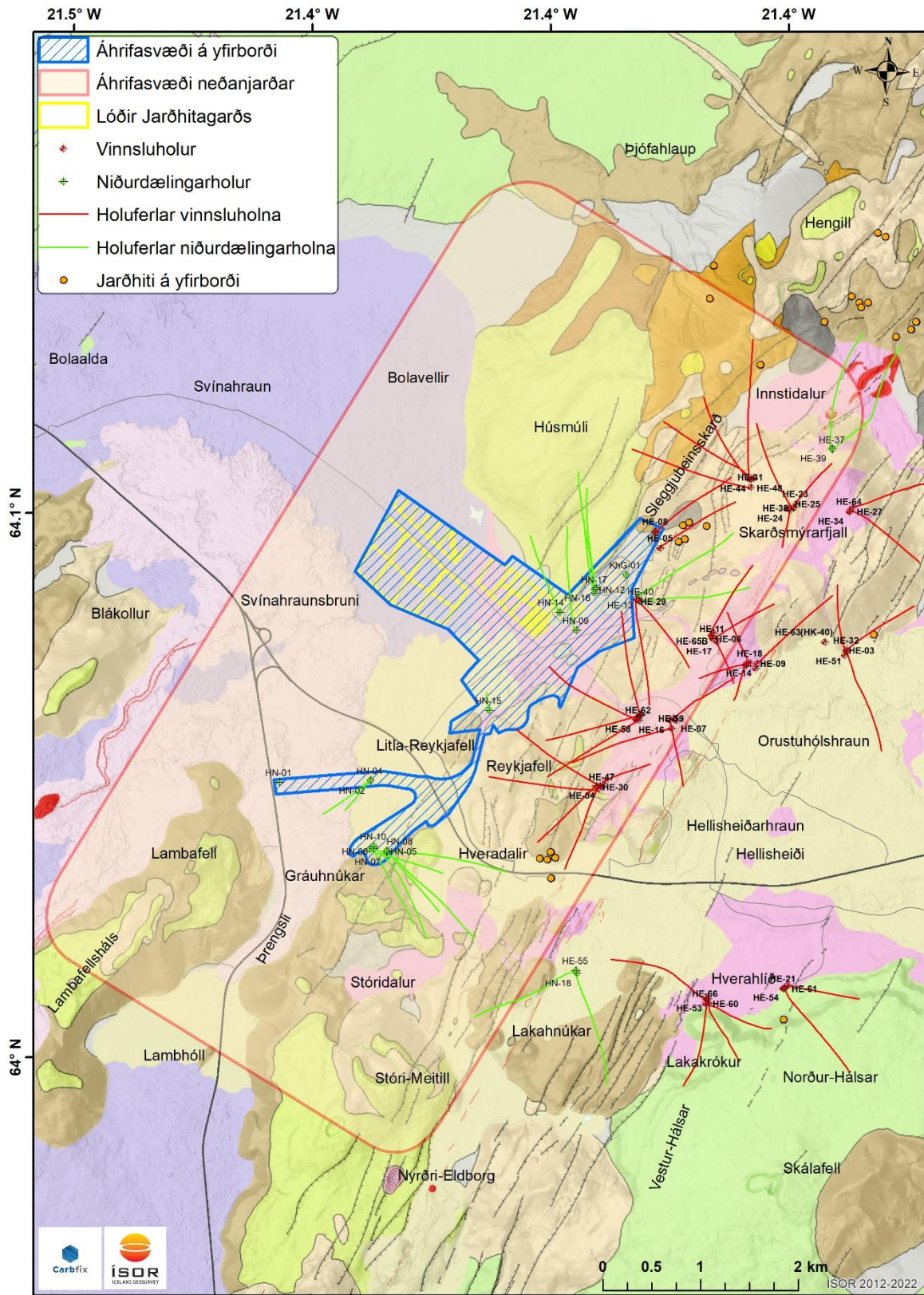
Mynd 8.1: Yfirlitskort af útvíkkuðu svæði sem tekið er inn í gerð nýs forðafræðilíkans. Upprunalega líkanið frá 2016 er sýnt sem blár ferningur og nýtt útvíkkað líkan frá 2022 sem rauður ferningur. Á myndinni má einnig sjá núverandi holur, holuferla og staðsetningar þversniða (sjá viðauka 3).



Mynd 8.2: Þversnið úr uppfærðu jarðfræði- og ummyndunarlíkani fyrir Hellisheiði í stefnu NV. Þversniðið sýnir jarðfræði og ummyndun í NV-SA þversniði við Hellisheiðarvirkjun (gul stjarna).

Geymslusvæði, þ.e.a.s. áhrifasvæði á yfirborði þar sem mannvirki og starfsemi Carbfix vegna núverandi og fyrirhugaðrar niðurdælingar CO₂ verða staðsett, er á vesturhluta iðnaðarsvæðisins á Hellisheiði. Það er alls um 4 km² og afmarkast af fyrirhuguðum borsvæðum fyrir niðurdælingarholur í Jarðhitagarði, í Húsmúla, Sleggjubeinsdal, Þrengslum og við Gráuhnúka, sjá **mynd 8.3**. Geymslugeymirinn, þ.e. áhrifasvæði fyrirhugaðrar niðurdælingar neðanjarðar, kemur hins vegar til með að ná yfir stærra landfræðilegt svæði undir yfirborði. Athugunarsvæði tengt greiningu á grunnástandi og mati á umhverfisáhrifum niðurdælingar CO₂ til geymslu í jörðu miðaðist því við stærra landfræðilegt svæði en áhrifasvæðið á yfirborði.

Umfjöllun um grunnástand og mat á áhrifum niðurdælingar CO₂ á geymslugeyminn byggir einkum á skýrslu Carbfix um forðafræðilíkan fyrir millikerfi og djúpkerfi geymslusvæðisins og spár um áhrif niðurdælingar á geymslugeyminn (**viðauki 1**), ásamt sérfræðiskýrslu ÍSOR um grunnástand geymslugeymisins, öðrum fyrirliggjandi gögnum er varða jarðfræði geymslusvæðisins og eðlis- og efnaeiginleika berggrunns, grunnvatns og jarðhitavökva og jarðskjálfta (**viðauki 3**).



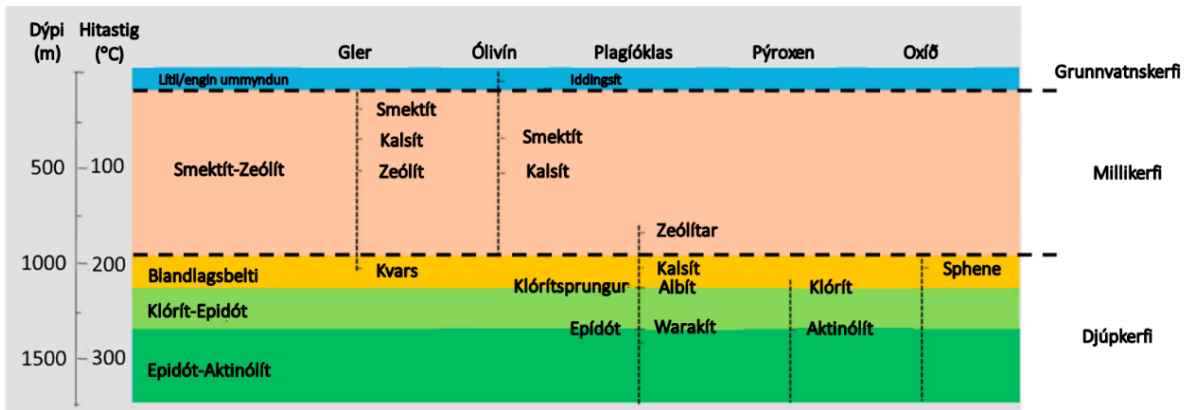
Mynd 8.3: Jarðfræðikort sem sýnir áhrifasvæði niðurdælingar á yfirborði og mögulegt áhrifasvæði neðanjarðar, auk lóða Jarðhitagarðs ON. Holutoppar og holuferlar vinnslu- og niðurdælingarhola eru í rauðum og grænum lit. Jarðhiti á yfirborði er sýndur með appelsínugulum punktum. Dökkbrúnir flákar tákna móberg og fjölbláir, bleikir og brúnir eru hraunlög. Svartar, mjóar línur tákna sprungur og misgengi og rauðar línur tákna gossprungur (mynd úr viðauka 3).

8.3 Grunnástand

Jarðhitasvæðið á Hellisheiði er hluti af Hengilskerfinu, sem samanstendur af megineldstöð, 60 til 100 km löngum sprungusveim með sigdæld í NNA stefnu, frá Selvogi í suðvestri til norðausturs í átt að Langjökli. Áhrifasvæði niðurdælingar CO₂ er á vesturjaðri sprungusveims Hengils og nær frá Húsmúla í norðri til Þrengsla í suðri. Landslagið til austurs einkennist af móbergshryggjum sem hlaðist hafa upp á jökulskeiðum og liggja nokkurn veginn í NNA stefnu, nálægt því þvert á rekstefnu. Á láglandi eru nútímahraun sem hafa runnið eftir að jökla leysti og á norðurhluta geymslusvæðisins eru setlög, sem eru tilkomin vegna framburðar úr ám og lækjum. Innan áhrifasvæðis á yfirborði eru ekki mikil greinanleg ummerki um jarðhita fyrir utan gufu og leirhverfi innst inni í Sleggjubeinsdal (**mynd 8.3**).

Vitneskja um jarðfræði geymslusvæðis neðanjarðar byggir að mestu á borholugögnum og gögnum úr jarðeðlisfræðilegum mælingum á borð við viðnáms- og jarðskjálftamælingar. Almenn einkennist jarðlagastaflinn á athugunarsvæðinu af basalti, bæði móbergsmyndunum og stöku hraunlagasýrpum inn á milli, en mismunandi myndunarumhverfi ræður því hvort hraun eða móberg myndist.

Á jarðhitasvæðum eins og á Hengilssvæðinu er ummyndun frumsteinda algeng, en það er 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 einnig stað í berggrunninum og er sérstaklega algengt á jarðhitasvæðum. Ummyndunarstig bergs og gerð ummyndunarsteinda hefur verið kortlögð á Hengilssvæðinu. Ummyndun eykst almennt með dýpi og er vitnisburður um hækkandi hita með dýpi. Beltin og ummyndunarhitastigið eru eftirfarandi: Zeólíta-smektítbelti (<200°C), blandlagsbelti (200-230°C), Klórít-epidót beltí (230-280°), Aktínólít beltí (>280°C) (**mynd 8.4**).



Mynd 8.4: Ummyndunarbeltin ásamt dýpi og ummyndunarhita á Hellisheiði. Myndin sýnir einnig áætlað dýpi djúperkis, millikerfis og grunnvatnskerfis (Mynd úr Snæbjörnsdóttir o.fl., 2018).

Dýpi niðurdælingar Carbfix á CO₂ til geymslu í jörðu á geymslusvæðinu á Hellisheiði miðast við eðli förgunar á fönguðu gasi. Tveir geymslugeymar eru nýttir fyrir niðurdælingu á Hellisheiði, annars vegar í svokölluðu millikerfi og í djúperki. Millikerfið er á um 300 til 700-1000 m dýpi á Hellisheiði, neðan efstu grunnvatnslaga en ofan háhitakerfisins og hitinn um 30°C til 200°C. Grunnvatnskerfið er aðskilið frá millikerfinu, með þéttara móbergslagi. Skilgreind neðri mörk millikerfisins miðast við lágviðnámskápu jarðhitaummyndunar sem umlykur háviðnámskjarna við kortlagningu háhitakerfisins. Efri mörk djúperkisins eru þau sömu og neðri mörk millikerfisins. Niðurdælingarholur sem verða nýttar til niðurdælingar CO₂ og H₂S úr útblæstri

Hellisheiðarvirkjunar í djúpkerfi eru um 1800-2500 m djúpar og fóðraðar í um 600-900 m. Hitastig í niðurdælingarholum ON er allt að 260°C. Nánari skilgreiningu á þessu millikerfi og djúpkerfi er að finna í kafla 3.3.2.

Nokkrir þættir hafa áhrif á lekt í basaltstafla, m.a. poruhluti, tenging milli pora, sprungur og ummyndun. Á Hellisheiðarsvæðinu er mesta lekt yfirleitt að finna á mótum jarðlaga áður en komið er í djúpkerfið sjálft. Lektin er þá fyrst og fremst milli einstakra hraunlaga í hraunlagasyrpum en auk þeirra eru móbergslög áberandi. Grunnvatnskerfin liggja aðallega í þessum hraunlagasyrpum. Í sumum tilvikum er gríðarlega há lekt en önnur þéttari lög skilja að grunnvatnsstraumakerfin. Poruhluti eða holrými geta haft mikil áhrif á lektina. Með tíma og auknum hita fyllast holrými smám saman af ummyndunarsteindum, sem falla út vegna samspils bergsins og vökvans sem leikur um það. Móberg er mjög glerríkt, sem gerir það að verkum að það er viðkvæmt fyrir ummyndun. Grunnstætt móberg er oft smektít-zeólíta ummyndað og því oft þétt. Það getur þá virkað sem stemmir á streymi vökva. Niðurstöður tilraunaniðurdælingarinnar og áður framkvæmdra ferilefnaprófa í tengslum við hana sýndu að lektin í berginu er blanda af svo kallaðri matrixulekt, þar sem vatn flæðir hægt um holrými í berginu sjálfu, og sprungulekt sem flytur vökva hraðar um kerfið²².

Á Hellisheiði er farið að gæta jarðhitaáhrifa í millikerfi á geymslusvæði Carbfix, sem er það dýpi sem CO₂ verður dælt niður í. Hitinn er um 30°C í efri hluta þess og um 200°C á mörkum millikerfisins og hins eiginlega djúpkerfis. Hitastigið í millikerfinu er fýsilegt fyrir steinrenningu CO₂ og geymslu þess í jarðlögum til lengri tíma. Millikerfið liggur neðan kalda grunnvatnskerfisins á 300 til 700 m dýpi, en fyrir neðan það tekur djúpkerfið við. Neðri mörk millikerfisins markast af djúpkerfinu sjálfu og miðast skilgreind mörk þess við lágviðnámskápu sem umlykur háviðnámskjarna við kortlagningu djúpkerfisins með viðnámsmælingum. Viðnámsmælingar nema jarðhitaummyndun og svarar háviðnám til ummyndunarbeltis sem myndast við yfir 240°C (klórít-epdót), sjá mynd 8.4.

Í djúpkerfinu einkennist lekt jarðlaga fyrst og fremst af sprungulekt og misgengjum. Sýnt hefur verið fram á að rennislísiðir niðurdælingarvökva stjórnast af flóknum sprungukerfum sem geta verið mjög staðbundin. Í Húsmúla hafa sprungustefnur verið flokkaðar í þrennt, NA lægar sprungur sem sjá má á yfirborði í Húsmúla leiða almennt vökva vel, N-S sprungur sem leiða vökva í NA lægar sprungur og VNV-ASA lægar sprungur sem stemma rennsli. Úti á sléttunni við Jarðhitagarðinn hafa engar sprungur verið kortlagðar á yfirborði enda er það þakið nútímahraunum. 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 (**viðauki 3**).

Jarðfræði Hellisheiðar er einstaklega hagstæð fyrir steinrenningu CO₂ þar sem berggrunnurinn er úr basísku gosbergi (basalti) sem er mjög hvarfgjarnt og inniheldur þá málma sem þarf til að binda CO₂ með steinrenningu. Tilraunaniðurdælingar og niðurdælingarverkefni hafa farið fram á Hellisheiði með góðum árangri, annars vegar í millikerfi (Carbfix1) í Þrengslum, og hins vegar í djúpkerfi (Carbfix2) á niðurdælingarvæði ON við Húsmúla. Sýnt hefur verið fram á steinrenningu CO₂ í basalti á aðeins fáeinum árum í Þrengslum²³ og á enn skemmri tíma í djúpkerfinu²⁴. Basaltið á Hellisheiði er jarðfræðilega ungt, brotkennt og lekt svo að vatn seytlar auðveldlega um sprungur og holrými neðanjarðar og eykur með því aðgang niðurdælingarvökvans að basaltinu.

²² Khalilabad o.fl., 2008.

²³ Matter o.fl., 2016.

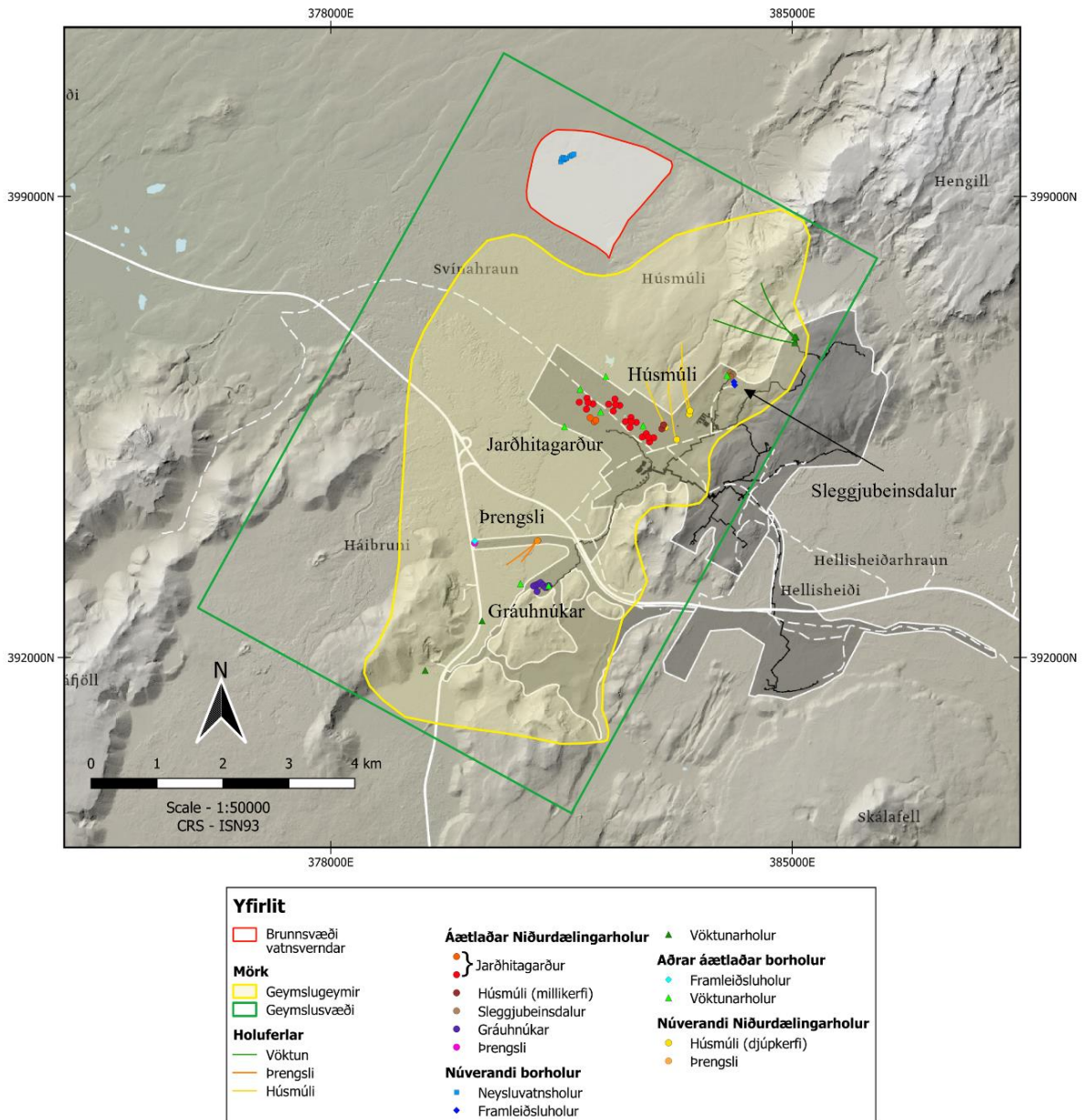
²⁴ Clark o.fl., 2020.

Niðurdælingarvökvinn hvarfast við basaltið sem leysir frá sér málma sem bindast CO₂ og mynda karbónatsteindir á borð við kalsít (CaCO₃). Þannig er CO₂ varanlega bundið – eða steinrunnið.

Geymslugeta jarðlaga á Hellisheiði

Steinrenning CO₂ stýrist af leysingu málma úr berginu en auk þess gegna lekt, hlutþrýstingur CO₂ og hitastig einnig stóru hlutverki. Uppfært forðafræðilíkan af Hellisheiði var nýtt var til að áætla geymslugetu á geymslusvæði Carbfix (**mynd 8.5**). Mörk forðafræðilíkansins miðast við afmörkun geymslugeymis, dýpi niðurdælingar og efri hitamörk steinrenningar CO₂. Afmörkun ytri marka geymslugeymisins byggir á spá um hámarksdreifingu niðurdælds CO₂ undir yfirborði samkvæmt líkanreikningum sem greint er frá í köflum 8.4.1 og 8.4.2. Lögum geymslugeymisins eins og fjallað er um í líkanreikningum (**viðauki 1**) mótast almennt af vatnafræðilegum aðstæðum og grunnvatnsflæði í jarðlögum, sjá umfjöllun grunnvatn og vatnajarðfræði í kafla 9 og **viðauka 2**. Geymslusvæðið nær yfir stærra svæði og þar undir falla geymslugeymirinn, millikerfið, djúpkerfið, vöktunarsvæði og brunnsvæði vatnsverndar. Áætluð geymslugeta endurspeglar ekki steinrenningu eða geymslugetu einstakra niðurdælingarsviðsmynda, heldur frekar mögulegt geymslurými geymslusvæðis á Hellisheiði í heild sinni miðað við allar niðurdælingarsviðsmyndir sem voru hermdar og eðlisfræðilegar takmarkanir steinrenningar CO₂.

Miðað við gefnar forsendur er fræðileg geymslugeta svæðisins sem forðafræðilíkanið nær til metin 840 til 15.800 milljónir tonna af CO₂ (MtCO₂). Ef gert er ráð fyrir lágmarks geymslugetu 840 MtCO₂ og fyrirhugaðri niðurdælingu upp að 406.000 tonn/ári af CO₂ (359.000 tonn/ári af CO₂ í millikerfi og 47.000 tonn/ári af CO₂ í djúpkerfi) tæki það yfir 2000 ár að nýta alla geymslugetuna (sjá nánar í **viðauka 1**).

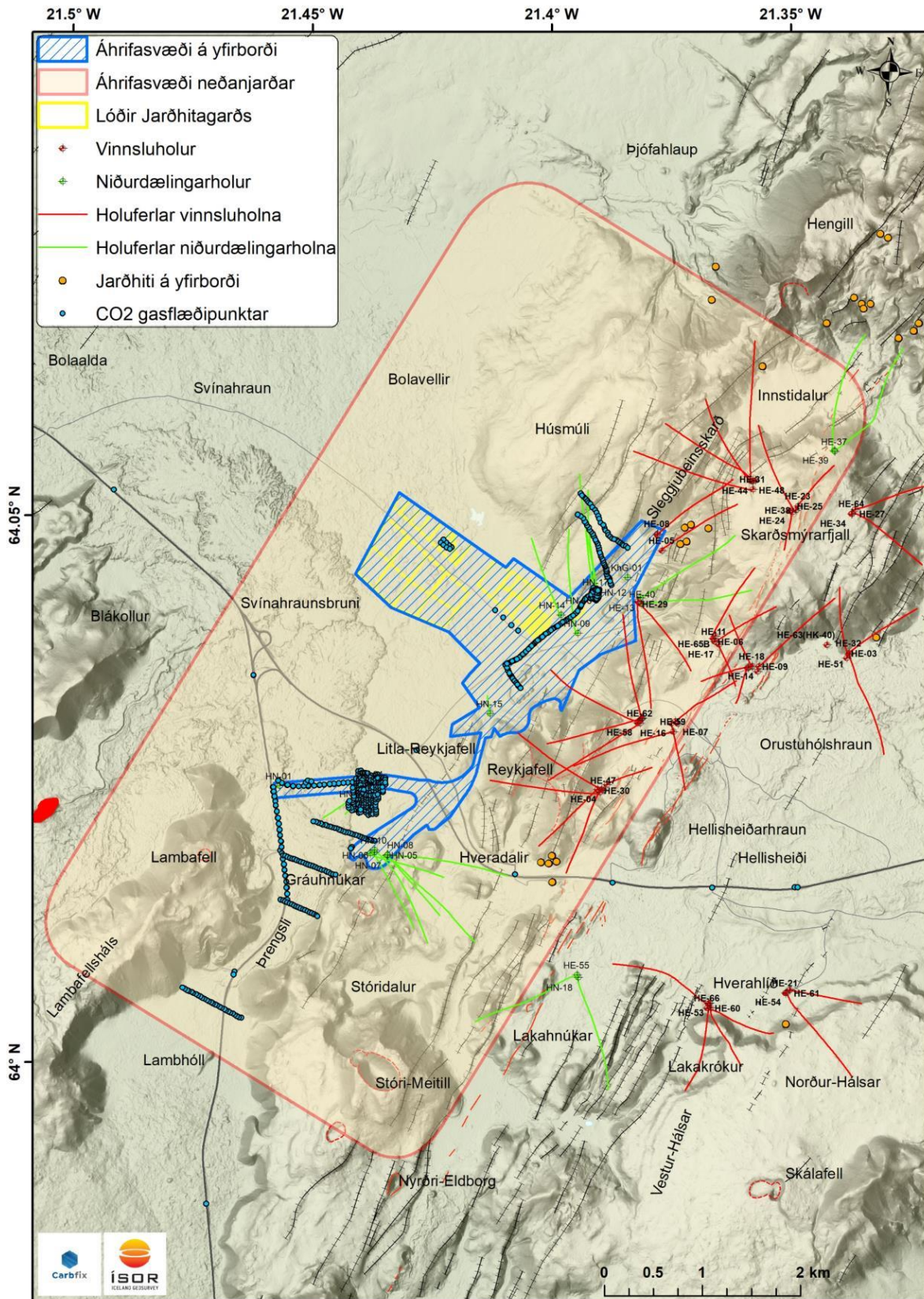


Mynd 8.5: Yfirlitskort af geymslugeymi og geymslusvæði ásamt núverandi og áætluðum borholum. Útmörk geymslugeymis eru ákvörðuð út frá niðurstöðum mismunandi sviðsmynda úr líkani, sjá umfjöllun um áhrif niðurdælingar CO₂ á geymslugeyminn 8.4.1 og 8.4.2. .

Náttúrulegt flæði CO₂ um yfirborð

Náttúrulegt flæði CO₂ um yfirborð frá jarðhitasvæðum á sér stað með tvennum hætti; annars vegar sem streymi frá takmörkuðum uppsprettum, s.s. hverum, gufuaugum o.fl., og hins vegar sem flæði í gegnum jarðveg. Áður en niðurdæling CO₂ í geymslugeymi hefst er nauðsynlegt að þekkja náttúrulegt flæði CO₂ um yfirborð á mögulegu áhrifasvæði.

Gasflæðimælingar á mögulegu áhrifasvæði niðurdælingar Carbfix hafa að hluta til þegar verið gerðar og grunnástand náttúrulegs flæðis CO₂ um yfirborð er því þekkt. Fyrirliggjandi niðurstöður byggja á mælingum sem voru gerðar á mismunandi tímabilum; fyrstu mælingar voru gerðar í Þrengslum árið 2008 og nýjustu mælingar eru frá árinu 2022 (**mynd 8.6**).



Mynd 8.6: Áhrifasvæði niðurdælingar á yfirborði og mögulegt áhrifasvæði neðanjarðar. Myndin sýnir lóðir Jarðhitagarðs, vinnsluholur (rauðar), niðurdælingarholur (grænar), jarðhiti á yfirborði (appelsínugulir punktar) og mælipunkta CO₂-gasflæðis og hitamælinga (bláir punktar).

Mælipunktarnir sýna langflestir gildi sem flokkast sem bakgrunnsgildi, þar sem CO₂-flæðið um yfirborð orsakast einungis af lífvirkni, eða gildi þar sem jarðhitaáhrifa gætir ekki. Niðurstöður mælinganna hafa verið notaðar til að tengja saman bakgrunnsgildi mælinga við yfirborðsgerð á áhrifasvæðinu og flokkunin yfirfærð á allt svæðið. Þannig var bakgrunnflæði alls áhrifasvæðisins metið og nýttist sem grunnmæligildi fyrir vöktunarmælingar á CO₂-flæði til yfirborðs. Almennt eru mæld gildi flæði CO₂ mjög lág. Meðalgasflæði í mældra punkta á athugunarsvæðinu Hellisheiði er 1,35 ppm/sek. Þegar niðurdæling á CO₂ hefst á geymslusvæðinu verða gasflæðimælingar endurteknar og fylgst með hvort CO₂-flæði um jarðveg aukist á áhrifasvæðinu. Mikil aukning á CO₂-flæði til yfirborðs á áhrifasvæðinu bendir til að leysnibinding hafi ekki haldist og CO₂ ekki náð að steinrennast sem er í andstöðu við það sem Carbfix tæknin gerir ráð fyrir. Hún gerir ráð fyrir að leysnibinding CO₂ náist innan fárra mínútna í geymslugeyminum og að ekkert CO₂ á gasformi geti lekið út úr niðurdælingarkerfinu um sprungur eða borholur, sjá nánar umfjöllun í kafla 3.3.1. Nánar er fjallað um gasflæðimælingar og náttúrulegt flæði á geymslusvæði Carbfix í 6. kafla sérfræðiskýrslu ÍSOR, **viðauka 3**.

8.4 Umhverfisáhrif

Umhverfismat niðurdælingar CO₂ og H₂S í djúpkerfi og niðurdælingar CO₂ í millikerfi til geymslu í jarðlögum á geymslusvæði á Hellisheiði byggir á sérfræðiskýrslu ÍSOR um grunnástand geymslusvæðisins (**viðauki 3**), forðafræðilíkangerð fyrir millikerfi og djúpkerfi (**viðauki 1**), ásamt mati á breytingum á geymslugeyminum sem kunna að fylgja niðurdælingu CO₂.

Eins og fram kemur í köflum 1.3 og 3.3 hér að framan felst Carbfix tæknin í svokallaðri leysnibindingu þar sem CO₂ er leyst í vatni áður en eða á meðan því er dælt í niðurdælingarholur, og steindabindingu eftir að CO₂ hvarfast við basalt berglög og myndar steindir. Niðurdælingarkerfi Carbfix tekur við CO₂-hlöðnu vatni sem dælt er í niðurdælingarholur undir nægilega háum þrýstingi til að tryggja áframhaldandi leysnibindingu í niðurdælingarvökvanum þar til vökvinn streymir út í geymslugeyminn við aðstæður þar sem tryggt er að CO₂ sé uppleyst. Carbfix tæknin er afar örugg, þar sem CO₂-hlaðna vatnið sem dælt er niður er eðlisþyngra en vatnið sem fyrir er í berglögnum og leitar því ekki til yfirborðs, auk þess sem basalt er gjarnan mjög brotkennt og lekt og seytlar vökvinn því auðveldlega gegnum sprungur og holrými neðanjarðar. Basalt er afar hvarfgjarnt og málmríkt. Þegar CO₂, sem leyst hefur verið í vatni, streymir út í basaltberggrunninn leysir það málma á borð við kalsíum, magnesíum og járn úr basaltinu. Þessir málmar ganga í efnasamband við CO₂ og falla út sem karbónatsteindir sem eru stöðugar í berggrunninum í þúsundir ára, og því engin hættu á að CO₂ leki aftur til yfirborðs. Snefilefni og þungmálmar geta einnig leyst úr basaltinu í byrjun steinrenningarferlisins. Mjög lítið er þó af þessum efnum í íslensku bergi, auk þess þau eru mun torleystari en kalsíum, magnesíum og járn karbónatsteindir og falla fyrir út og hverfa úr lausninni. Því er mjög lítil hættu talin á mengun grunnvatns frá þessum efnum. Carbfix hefur sýnt fram á að yfir 95% af CO₂ sem dælt er niður steinrennist á innan við tveimur árum í millikerfinu²⁵, og enn hraðar í djúpkerfinu²⁶, sem er mun skemmri tími en áður var talið. Geymsla CO₂ með Carbfix tækninni er því ein öruggasta geymsla á CO₂ sem völ er á.

Forðafræðilíkan var notað til að herma flæði á CO₂ hlöðnu í vatni um geymslugeyminn og spá fyrir um áhrif niðurdælingar CO₂ miðað við að engin steinrenning CO₂ eigi sér stað. Með því móti fæst fræðilegt mat á mestu mögulegu dreifingu CO₂ um jarðlögin og þar með hámarksáhrif niðurdælingar CO₂ á geymslugeyminn. Tveir geymslugeymar eru nýttir fyrir niðurdælingu á CO₂ á

²⁵ Matter o.fl., 2016.

²⁶ Clark o.fl., 2020.

Helligshéið, annars vegar geymslugeymir í svokölluðu millikerfi og hins vegar geymslugeymir í djúpkerfi (sjá nánari umfjöllun í kafla 3.3.2 hér að framan).

8.4.1 Áhrif niðurdælingar CO₂ í millikerfi

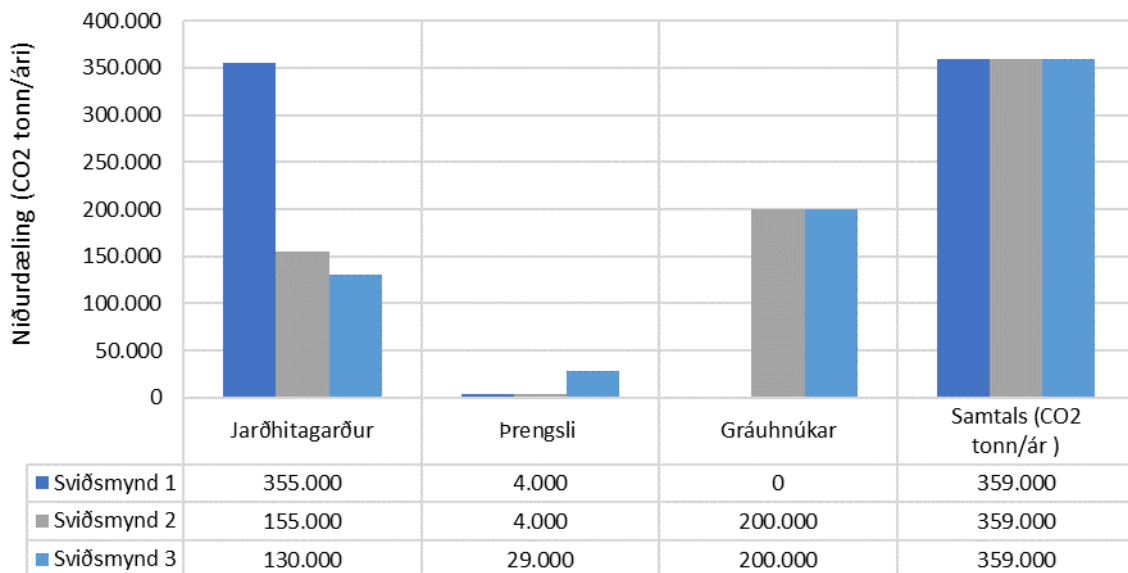
Þrjár megin sviðsmyndir eru skoðaðar í forðafræðilíkaninu fyrir niðurdælingu CO₂ í millikerfi á borsvæðum í Jarðhitagarði, í Þrengslum og við Gráuhnúka:

Sviðsmynd 1: Niðurdæling í millikerfi allt að 355.000 tonn/ári af CO₂ í Jarðhitagarði og allt að 4.000 tonn/ári af CO₂ í Þrengslum.

Sviðsmynd 2: Niðurdæling í millikerfi allt að 155.000 tonn/ári af CO₂ í Jarðhitagarði, allt að 200.000 tonn/ári af CO₂ við Gráuhnúka og allt að 4.000 tonn/ári af CO₂ í Þrengslum.

Sviðsmynd 3: Niðurdæling í millikerfi allt að 130.000 tonn/ári af CO₂ í Jarðhitagarði, allt að 200.000 tonn/ári af CO₂ við Gráuhnúka og allt að 29.000 tonn/ári af CO₂ í Þrengslum.

Þessar sviðsmyndir eru valdar til að meta áhrif af umfangsmikilli niðurdælingu í millikerfi á borsvæðum geymslusvæðisins í Jarðhitagarði, í Þrengslum og við Gráuhnúka, sjá einnig súlurit á mynd 8.7.



Mynd 8.7: Þrjár megin niðurdælingarsviðsmyndir forðafræðilíkansins í millikerfi.

Metin eru áhrif á niðurdælingar CO₂ í millikerfi á:

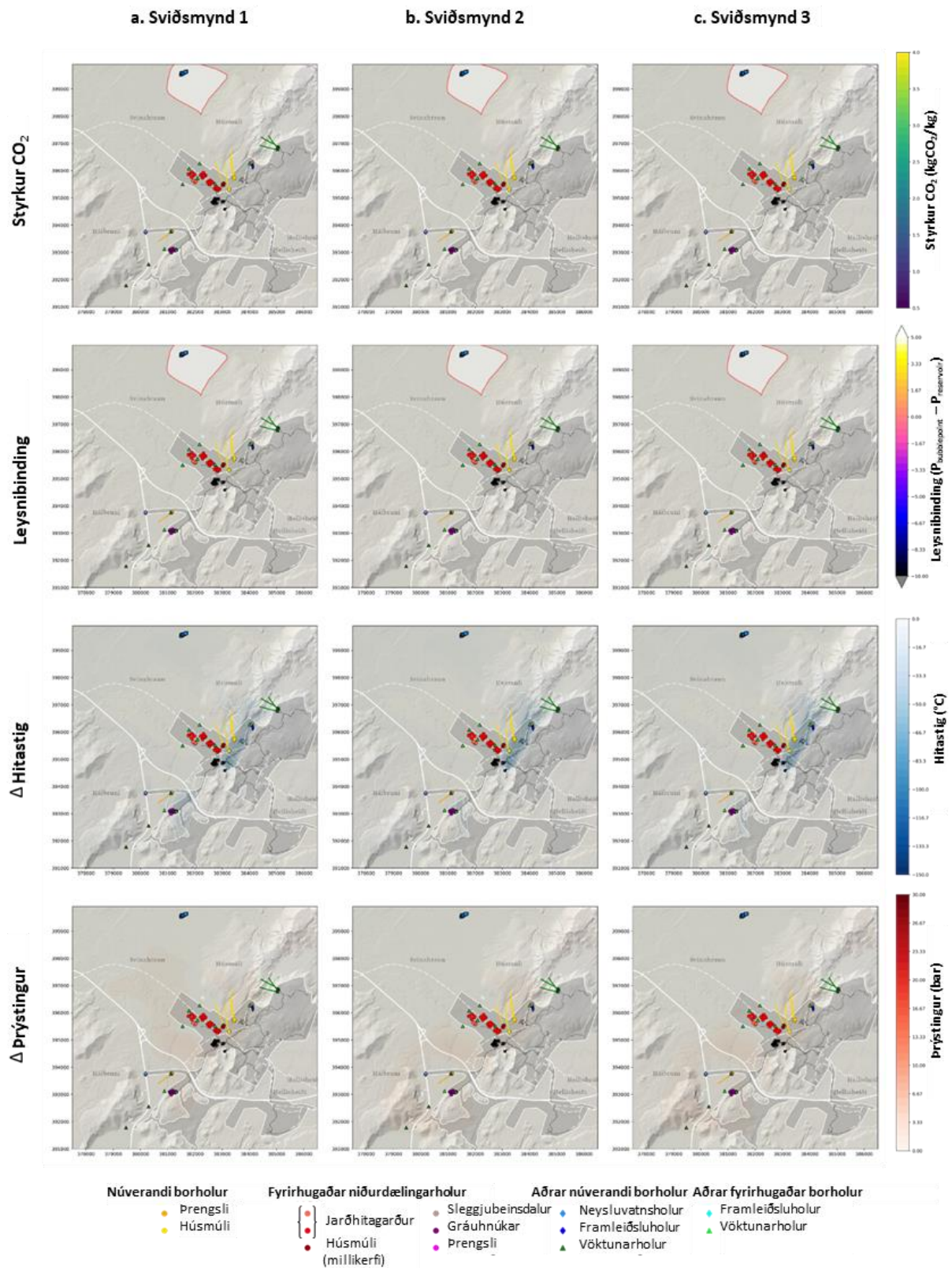
1. Grunnvatnskerfi og vatnsveitu
2. Millikerfið sjálft
3. Djúpkerfið og þ.m.t. jarðhitavinnslu

Áhrif niðurdælingar í millikerfi á grunnvatnskerfi og vatnsveitu

Mynd 8.8 sýnir samanburð sviðsmynda 1, 2 og 3 um áhrif á grunnvatnskerfið (75 m y.s.) þar sem forðafræðilíkaníð var nýtt til að spá fyrir um mögulega hámarksdreifingu á niðurdældu CO₂ hlöðnu vatni í jarðlögum, leysnibindingu CO₂ og hita- og þrýstingsbreytingar, eftir niðurdælingu CO₂ í millikerfi í 30 ár. Allar sviðsmyndir sýna að tryggt verður að geymsla CO₂ takmarkast við millikerfið og berst ekki í grunnvatnskerfið.

Engin sviðsmyndanna sýnir að áhrif niðurdælingar í millikerfi nái til efra grunnvatnskerfis á brunnsvæði vatnsverndarsvæðis í Engidal eftir 30 ára niðurdælingu. Samkvæmt spá forðufræðilíkansins dreifist CO₂ í átt að Engidal. Vegna þess og vegna almennrar óvissu í líkangerð, þarf að skoða staðsetningu vöktunarhola sem ná til millikerfisins og grunnvatnskerfisins í nokkurri fjarlægð frá niðurdælingarholum í átt að Engidal. Það mun tryggja öryggi vatnsverndarsvæðisins og nýtast til að sannreyna niðurstöður líkanreikninga.

Við gerð forðufræðilíkans (**viðauki 1**) sem vísað er til í þessari umhverfismatsskýrslu er reiknað með 900 L/s vatnsvinnslu að jafnaði árlega frá Engidal sem er í samræmi við núverandi vinnslu á svæðinu. ON hefur hins vegar leyfi fyrir nýtingu 2000 L/s að meðaltali en vinnslan árið 2021 var um 900 L/s að meðaltali. Ef vatnsvinnsla breytist í Engidal og fer í hámarksvinnslu samkvæmt gildandi nýtingarleyfi, þarf að uppfæra líkanreikninga fyrir niðurdælingarsviðsmyndir CO₂ í millikerfi.



Mynd 8.8: Samanburður niðurdælingarsviðsmynda 1, 2 og 3 fyrir grunnvatnskerfið (75 m y.s) eftir 30 ár af niðurdælingu í millikerfi með tilliti til hámarks dreifingar CO₂ hlaðna niðurdælingarvökvans, leysnibindingar og hita- og þrýstingsbreytinga.

Áhrif niðurdælingar CO₂ í millikerfi á millikerfið

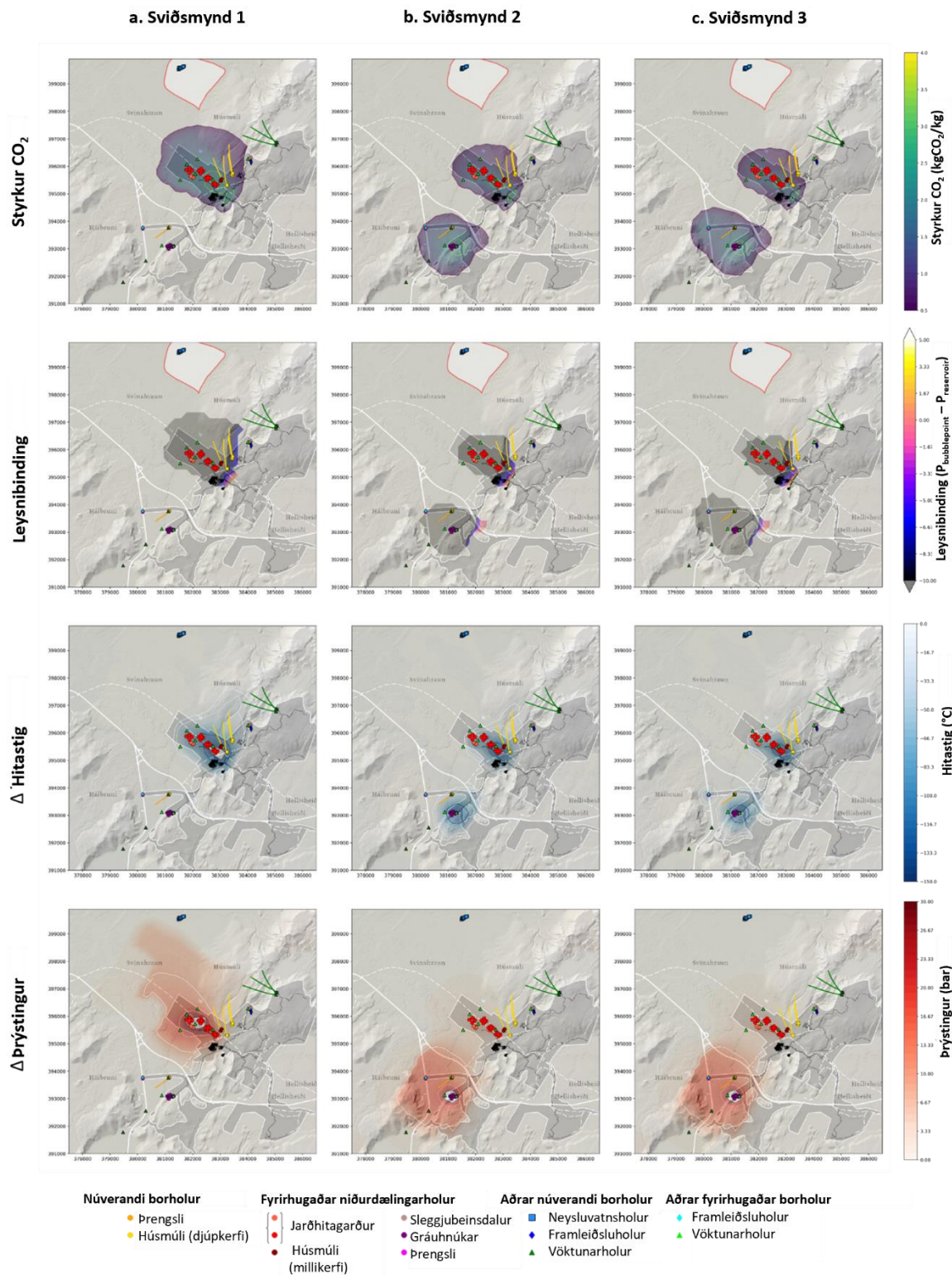
Mynd 8.9 sýnir samanburð líkanareikninga fyrir framangreindar sviðsmyndir 1, 2 og 3 um áhrif á millikerfið (380 m u.s) með tilliti til hámarksdreifingar CO₂ hlaðna niðurdælingarvökvans, leysnibindingar CO₂, hita- og þrýstibreytinga, eftir niðurdælingu CO₂ í millikerfi í 30 ár.

Allar sviðsmyndir sýna að virkni leysnibindingar er alltaf viðhaldið þar sem hlutþrýstingur CO₂ (P_{CO2}) er langt undir vatnsþrýstingi í geymslugeymi samkvæmt líkanareikningum. Fyrstu niðurstöður líkanareikninga benda því til þess að millikerfið sé góður kostur fyrir niðurdælingu á CO₂ uppleystu í vatni. Búast má við staðbundinni hitalækkun næst niðurdælingarholum þar sem niðurdælingarvökvinn er kaldari en vatn sem fyrir er í jarðlögum millikerfisins. Áhrif þrýstingsbreytinga teygja sig í átt að mörkum brunnsvæðis vatnsverndarsvæðisins í Engidal en einungis á talsverðu dýpi, þ.e. 380 m u.s í millikerfinu, og gætir aðeins lítillaga í efri grunnvatnslögum og djúpkerfi. Þar sem engar vatnsvinnsluholur eða vinnsluholur fyrir Hellisheiðarvirkjun eru í millikerfinu eru taldar litlar líkur á að hita- og þrýstingsbreytingar hafi áhrif á vatnsvinnslu eða jarðhitavinnslu.

Spár um dreifingu CO₂ frá niðurdælingu í Jarðhitagarði í átt að Engidal sýna að skoða þarf staðsetningu vöktunarhola sem ná til millikerfisins í nokkurri fjarlægð frá niðurdælingarholum í stefnu að Engidal til að tryggja öryggi vatnsverndarsvæðisins og til að sannreyna niðurstöður líkanareikninga. Ólíklegt er þó talið að CO₂ nái til brunnsvæðisins, þar sem hámarksdreifing reiknast í 380 m u.s. og búist við að steinrenning CO₂ hafi þegar átt sér stað. Dýpsta vatnsvinnsluholan á Engidalssvæðinu nær niður í 39 m u.s. Hugsanleg dreifing CO₂ frá niðurdælingu í millikerfi er talin algjörlega aðskilin frá efri grunnvatnslögum og því ekki talin hafa áhrif á vatnsverndarsvæðið í Engidal.

Aldrei hefur greinst leki CO₂ til yfirborðs vegna niðurdælingarverkefna Carbfix, né aukning á CO₂-flæði um jarðveg. Samkvæmt niðurstöðum forðafræðilíkans fyrir allar sviðsmyndir niðurdælingar í millikerfi sýna líkanareikningar að leysnibindingu CO₂ er viðhaldið. Því er hvorki búist við að CO₂ uppleyst í vatni né á gasformi geti streymt út fyrir millikerfið og upp til yfirborðs. Sjá nánari umfjöllun um niðurstöður hermireikninga í **viðauka 1**. Gasflæðimælingar hafa verið gerðar á Hellisheiði og náttúrulegt flæði CO₂ um yfirborð er því þekkt á mögulegu áhrifasvæði. Þegar niðurdæling CO₂ hefst verða gasflæðimælingar endurteknar og þannig er fylgst með hvort flæði CO₂ hafi breyst. Verði vart við aukið flæði CO₂ um jarðveg er það vísbending um að CO₂ haldist ekki uppleyst í niðurdælingarvökvanum og hafi ekki náð að steinrenna, sem eru meiri áhrif en var spáð. Þá verður forðafræðilikanið uppfært með hliðsjón af nýjum upplýsingum og unnin ný spá um dreifingu CO₂. Ef nýir líkanareikningar sýna að búast megi við neikvæðum áhrifum á grunnvatn eða geymslugeyminn, þá þarf að endurskoða fyrirhugaða vöktunaráætlun og staðsetningu niðurdælingarhola.

Áætluð geymslugeta sviðsmyndar 1 sýnir að fræðilega væri hægt að steinrenna allt að 923 Mt CO₂ með niðurdælingu í millikerfi, sem er margfalt það magn CO₂ sem Carbfix áformar að dæla niður geymslsvæðinu á Hellisheiði. Með niðurdælingu CO₂ í niður í millikerfi til geymslu í jarðlögum verður dregið úr styrk þessarar gróðurhúsalofttegundar í andrúmslofti og komið í veg fyrir neikvæð áhrif á loftslag.

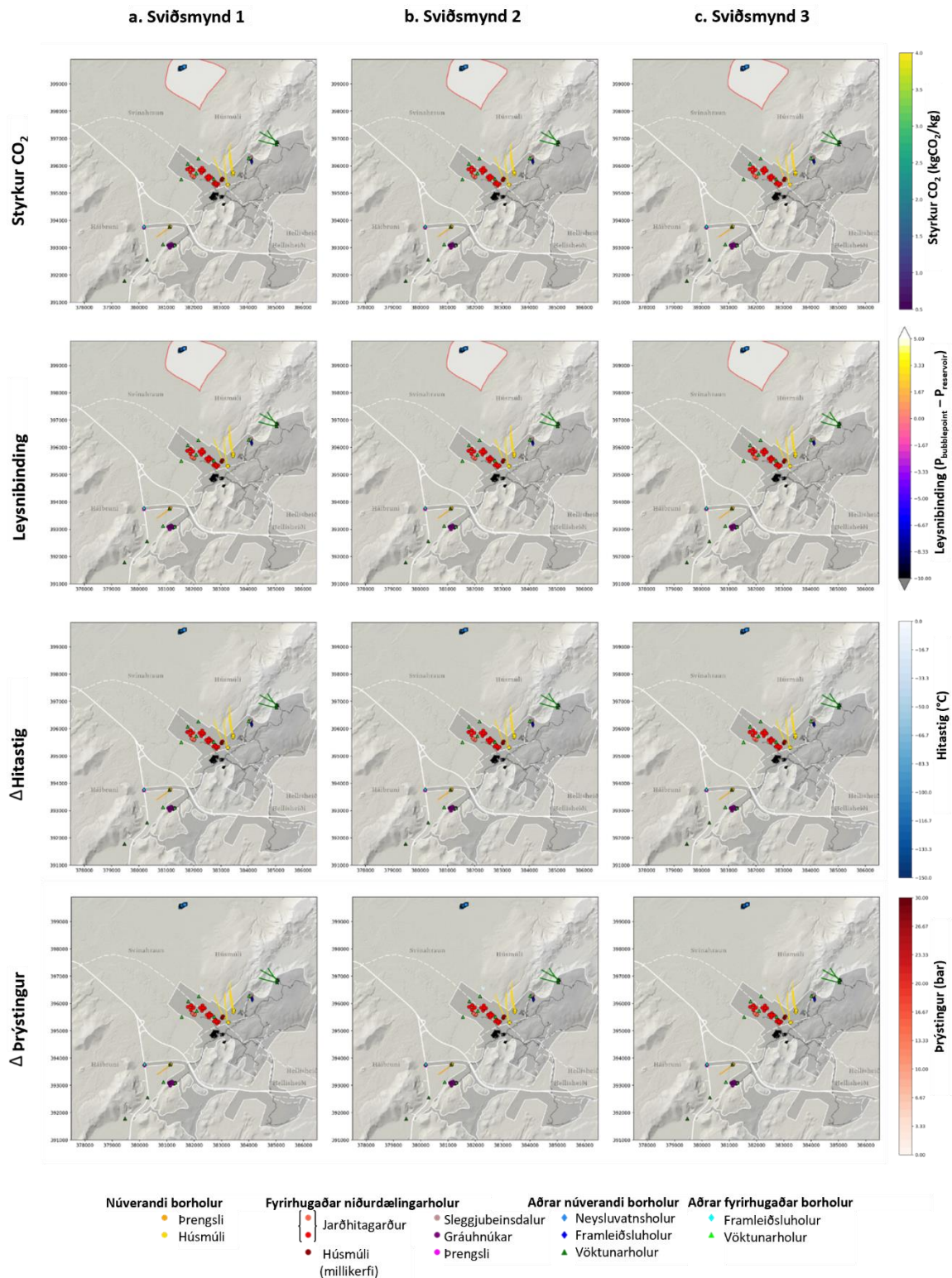


Mynd 8.9: Samanburður niðurdælingarsviðsmynda 1, 2 og 3 fyrir millikerfið (380 m u.s.) eftir 30 ár af niðurdælingu í millikerfið með tilliti til hámarksdreifingar CO₂ hlaðna niðurdælingarvökvans, leysnibindingar og hita- og þrýstingsbreytinga.

Áhrif niðurdælingar CO₂ í millikerfið á djúpkerfið og vinnslu jarðhitavökva

Mynd 8.10 sýnir samanburð sviðsmynda 1, 2 og 3 um áhrif á djúpkerfi (1000 m u.s) þar sem forðafræðilíkaníð var nýtt til að spá fyrir um mögulega hámarksdreifingu á niðurdældu CO₂ hlöðnu vatni í jarðlögum, leysnibindingu CO₂ og hita- og þrýstingsbreytingar, eftir niðurdælingu CO₂ í millikerfi í 30 ár.

Allar sviðsmyndir sýna að tryggt verður að geymsla CO₂ takmarkast við millikerfið og berst ekki inn í djúpkerfið. Þannig mun niðurdæling CO₂ til geymslu í millikerfi ekki hafa áhrif á jarðhitavinnslu á Hellisheiði, eða niðurdælingu jarðhitavökva og CO₂ í djúpkerfi.



Mynd 8.10: Samanburður niðurdælingarsviðsmynda 1, 2 og 3 fyrir djúpkerfið (1000 m u.s.) eftir 30 ár af niðurdælingu í millikerfið með tilliti til mestu dreifingar CO₂ hlaðna niðurdælingarvökvans, leysnibindingar og hita- og þrýstingsbreytinga.

Heildarniðurstöður líkanareikninga vegna niðurdælingar CO₂ í millikerfið

Heildarniðurstöður líkanareikninga út frá niðurdælingarsviðsmyndum 1, 2 og 3 fyrir millikerfið (sjá kafla 8.4) eru teknar saman í **töflu 8.1**. Eins og fyrr segir í inngangi kafla 8.4 eru útreikningar gerðir fyrir flæðireikninga þar sem engin efnahvörf eiga sér stað og sýnir líkanið því hámarksdreifingu CO₂ þar sem ekkert CO₂ er bundið í steindir. Hámarksflatarmál (áætlað út frá hámarksflatarmáli þar sem styrkur CO₂ er meiri en 0,1%) og meðalflatarmál dreifingar CO₂-hlaðna niðurdælingarvökvans í millikerfinu (100-600 m u.s.) er tiltekið, hámarksstyrkur CO₂ á niðurdælingarsvæðinu (% CO₂ vökva reiknað út frá massa) og hámarksrúmmál bergs sem niðurdælingarvökvinn kemst í snertingu við. Hámarksrúmmál bergs nýtist jafnframt til að reikna áætlaða geymslugetu ásamt áætluðu poruhlutfalli bergsins og eðlisþyngd karbónatsteinda. Loks er tryggt að geymsla CO₂ takmarkist við millikerfið með leysnibindingu sem reiknað er út frá þrýstun milli gasbóluprýstings CO₂ í niðurdælingarvökvannum og vatnsþrýstings í geymslugeyminum.

Niðurstöður líkanareikninga auk frekari útreikninga við sviðsmynd 1 til að herma mismunandi niðurdælingu innan svæðis (sviðsmynd 1b og sviðsmynd 1c) má finna í **viðauka 1**. Í ljósi þess að þær sviðsmyndir gefa allar svipaðar niðurstöður er sviðsmynd 1 einungis notuð hér.

Tafla 8.1: Niðurstöður líkanareikninga út frá mismunandi niðurdælingarsviðsmyndum fyrir millikerfið. Hámarksstyrkur CO₂ í vökvafasa, meðalflatarmál og hámarksflatarmál dreifingar niðurdælingarvökvans í millikerfi, hámarksrúmmál bergs áætlað út frá rúmmáli þess bergs sem kemst í snertingu við niðurdælingarvökvann og áætluð geymslugeta.

Niðurdælingar-sviðsmynd	Meðaltal flatarmáls (km ²)	Hámarks flatarmál (km ²)	Hámarks styrkur CO ₂ (%)	Hámarks rúmmál bergs (km ³)	Áætluð geymslugeta (MtCO ₂)	Geymsla CO ₂ takmarkast við millikerfið
1	7,2	9,6	1,64	2,19	923	✓
2	8,6	11,6	1,4	2,12	896	✓
3	8,1	11,1	1,3	1,97	829	✓

*Reiknað út frá hámarksrúmmáli bergs, poruhlutfalli og eðlisþyngd karbónatsteinda (2.711 kg/m³)

8.4.2 Áhrif niðurdælingar CO₂ í djúpkerfi

Áætlað er að auka niðurdælingu CO₂ úr útblæstri Helligshólsvirkjunar í djúpkerfið í Húsmúla úr um 12.000 tonnum/ári af CO₂ í allt að 47.000 tonn/ári af CO₂ árið 2025 með föngun þess í nýrri hreinsistöð sem byggð verður sem hluti af Silfurberg verkefninu (sjá einnig umfjöllun um verkefnið í kafla 1.2 og 6.1 hér að framan). Samhliða niðurdælingu CO₂ verður H₂S úr útblæstri virkjunarinnar einnig dælt niður í djúpkerfi í Húsmúla.

Jarðhitagösin CO₂ og H₂S sem verða fönguð í hreinsistöðinni eru upprunin í háhitakerfinu og með niðurdælingu í djúpkerfi er þeim skilað þangað aftur. Þar að leiðandi verður engin heildaraukning af þessum gösum í djúpkerfinu.

Þrjár mismunandi sviðsmyndir niðurdælingar í djúpkerfi eru skoðaðar í forðafærðlíkaninu til að herma afdrif niðurdælds CO₂ og H₂S og leggja mat á hugsanleg áhrif niðurdælingar á djúpkerfið og jarðhitauuðlindina.

Sviðsmynd 1: CO₂ (og H₂S) niðurdæling í djúpkerfi í holu HN-16 í Húsmúla.

Sviðsmynd 2: CO₂ (og H₂S) niðurdæling í djúpkerfi í holur HN-16 og HN-14 í Húsmúla.

Sviðsmynd 3: CO₂ (og H₂S) niðurdæling í djúpkerfi í holur HN-16, HN-14, HN-12 og HN-09 í Húsmúla og Sleggjubeinsdal.

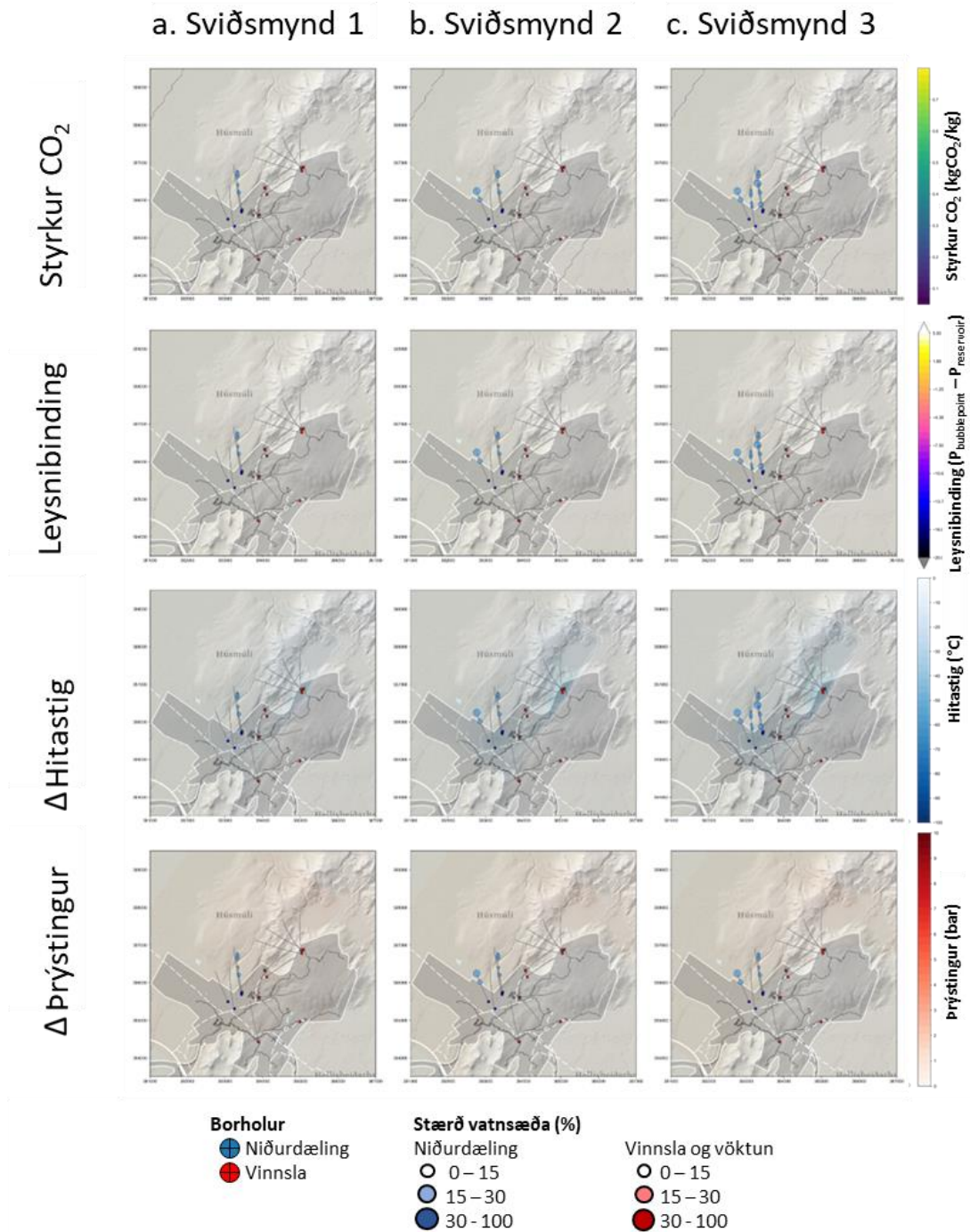
Metin eru áhrif á niðurdælingar CO₂ í djúpkerfið á:

1. Grunnvatnskerfi og vatnsveitu
2. Millikerfið
3. Djúpkerfið og þ.m.t. jarðhitavinnslu

Áhrif niðurdælingar CO₂ í djúpkerfi á grunnvatnskerfi og vatnsveitu

Mynd 8.11 sýnir samanburð sviðsmynda 1, 2 og 3 fyrir grunnvatnskerfið (100 m u.s.) þar sem forðafræðilíkanið var nýtt til að spá fyrir um mögulega hámarksdreifingu á niðurdældu CO₂ hlöðnu vatni í jarðlögum, leysnibindingu CO₂ og hita- og þrýstingsbreytingar, eftir niðurdælingu CO₂ í djúpkerfi í 30 ár. Niðurstöður allra sviðsmynda sýna að ekkert CO₂ mun berast í grunnvatnskerfi ofan þessa dýpis vegna niðurdælingar CO₂ í djúpkerfi.

Ljóst er að lágviðnámskápa á mörkum millikerfis og djúpkerfis, kemur í veg fyrir að niðurdælt CO₂ berist til yfirborðs, rétt eins og það gerir þegar jarðhitavökva er dælt niður í djúpkerfi. Því er talið að niðurdæling CO₂ og H₂S í djúpkerfið hafi hvorki áhrif á grunnvatnskerfið né vatnstökuholur á athugunarsvæði þessa umhverfismats. Jafnvel fyrir sviðsmynd sem sýnir hámarksdreifingu, er ekki búist við neinu CO₂ nálægt vatnsbólunni í Engidal. Niðurdæling CO₂ og H₂S í djúpkerfi hefur því ekki áhrif á grunnvatnskerfið.



Mynd 8.11: Samanburður niðurdælingarsviðsmynda 1, 2 og 3 fyrir grunnvatnskerfið (100 m u.s.) eftir 30 ár af niðurdælingu í djúpkervi með tilliti til hámarksdreifingar CO₂ hlaðna niðurdælingarvökvans, leysnibindingar og hitastigs- og þrýstingsbreytinga.

Áhrif niðurdælingar CO₂ í djúpkerfið á millikerfið

Niðurstöður forðafraeðilíkansins fyrir allar sviðsmyndir um mögulega dreifingu niðurdælingarvökva í millikerfi (100 m u.s.) eftir 30 ára niðurdælingu í djúpkerfi er að ekkert CO₂ verði í marktækum styrk. Í líkaninu er ekki reiknað með að CO₂ berist í millikerfið úr djúpkerfi vegna lággegndræpu lágviðnámskápunnar sem hindrar rennsli þar á milli. Lágviðnámslagið eykur öryggi niðurdælingar í djúpkerfið vegna þessa aðskilnaðar milli djúpkerfis og millikerfis.

Áhrif niðurdælingar CO₂ í djúpkerfi á djúpkerfið

Mynd 8.12 sýnir samanburð sviðsmynda 1, 2 og 3 fyrir djúpkerfið (1600 m.u.s) þar sem forðafraeðilíkanið var nýtt til að spá fyrir um mögulega hámarksdreifingu á niðurdældu CO₂ hlöðnu vatni í jarðlögum, leysnibindingu CO₂ og hita- og þrýstingsbreytingar, eftir niðurdælingu CO₂ í djúpkerfi í 30 ár.

Niðurstöður fyrir allar þrjár sviðsmyndirnar sýna að geymsla CO₂ takmarkast við djúpkerfið og leysnibindingu er alltaf viðhaldið. Þessar niðurstöður sýna jafnframt að H₂S nýtur góðs af leysnibindingu og helst í djúpkerfinu ásamt CO₂ þaðan sem það er náttúrulega upprunið. Líkanreikningar fyrir hámarksdreifingu þar sem ekki er gert ráð fyrir steinrenningu CO₂ sýnir dreifingu CO₂ frá niðurdælingarholum í Húsmúla eftir megin sprungustefnu í átt að NA-hluta djúpkerfisins.

Hámarksdreifing CO₂ fyrir niðurdælingu í djúpkerfi kemur fram í sviðsmynd 1. Þrátt fyrir að um hámarksdreifingu sé að ræða er styrkur CO₂ í vökva á áhrifasvæðinu minni en ~1% eftir 30 ár. Því er ljóst að við niðurdælingu í djúpkerfi hefur niðurdælingarvökvinn lítil áhrif á heildarsamsetningu þess vökva sem fyrir er í kerfinu. Áhrif niðurdælingar á vatnsverndarsvæðið í Engidal eru metin hverfandi þar sem geymsla CO₂ takmarkast við djúpkerfið og ólíklegt að niðurdælingarvökvinn berist þangað. Því er ekki þörf á nýjum djúpum vöktunarholum fjær niðurdælingarholum í átt að Engidal.

Væg þrýstingsaukning, allt að 5 bör, kemur fram í sviðsmyndum 1 og 3, um einum km sunnan niðurdælingarhola í Húsmúla. Í sviðsmynd 2 kemur fram óveruleg þrýstingshækkun (<1 bar). Þessi væga þrýstingsaukning í öllum sviðsmyndum er ekki talin skapa hættu á örvaðri jarðskjálftavirkni og ekki er þekkt að niðurdæling CO₂ hafi orsakað skjálftavirkni í Húsmúla²⁷.

Eins og áður segir (kafli 8.4.1) hefur aldrei greinst leki CO₂ til yfirborðs vegna niðurdælingarverkefna Carbfix, né aukning á CO₂-flæði um jarðveg. Niðurstöður líkanreikninga fyrir allar sviðsmyndir niðurdælingar djúpkerfi eru að leysnibindingu CO₂ er viðhaldið í og hvorki búist við að CO₂ leysti í vatni né á gasformi geti streymt úr djúpkerfi upp til yfirborðs. Sjá nánari umfjöllun um niðurstöður hermireikninga í **viðauka 1**. Gasflæðimælingar hafa verið gerðar á Helligshóli og náttúrulegt flæði CO₂ um yfirborð er því þekkt á mögulegu áhrifasvæði. Gasflæðimælingar verða endurteknaðar á geymslusvæði Carbfix eftir að niðurdæling hefst til að fylgjast með hvort flæði CO₂ breytist. Verði vart við aukið flæði CO₂ er það vísbending um að CO₂ haldist ekki uppleyst í niðurdælingarvökvanum og hafi ekki náð að steinrennast.

Áhrif niðurdælingar CO₂ í djúpkerfið á vinnslu jarðhitavökva

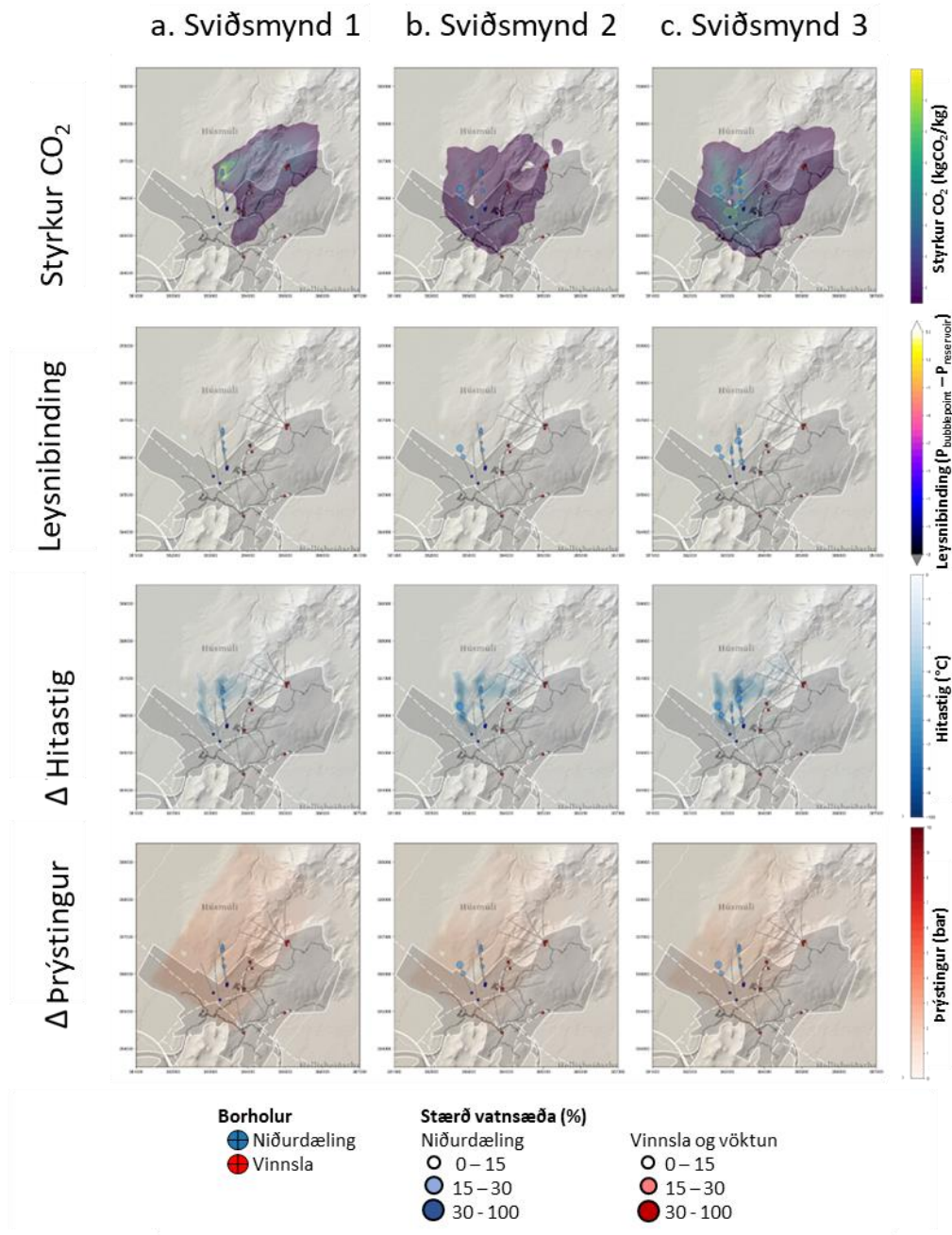
Samkvæmt spá forðafraeðilíkansins verður lítils háttar hitalækkun nálægt niðurdælingarholum, sérstaklega í sviðsmyndum 1 og 3, þar sem niðurdælingarvökvinn er kaldari en vatn sem fyrir er í jarðlögum. Hitabreytingar af þessum toga verða mun hægari en breytingar í styrk ferilefna í rennislíðum, sem þýðir að slík kæling ætti ekki hafa mikil áhrif á hitaskilyrði bergsins í kring.

²⁷ Hjörleifsdóttir o.fl., 2021.

Miðað við rennislíleiðir niðurdælingarvökva í Húsmúla (NA-stefna) gætu mestu áhrif niðurdælingar CO₂ í djúpkerfi á jarðhitavinnslu orðið á vinnslusvæðinu á Skarðsmýrarfjalli. Samkvæmt sviðsmynd 1 fyrir niðurdælingu í djúpkerfi, þá verða mestu mögulegu áhrif vegna aukins styrks CO₂ við vinnslusvæði á Skarðsmýrarfjalli vegna nálægðar við niðurdælingarholu HN-16 í Húsmúla og vinnsluholur ON, HE-31, HE-48 og HE-44.

Fyrri forðafraeðilíkön fyrir langtímaniðurdælingu í Húsmúla sýndu að í vinnsluholu HE-31, sem er næst niðurdælingarholu HN-16, gæti komið fram lækkun í vermi árið 2030 (< 900 kJ·kg⁻¹) sem yrði til þessa að holan nýtist ekki til rafmagnsframleiðslu með núverandi tækni. Niðurdæling þéttivatns og skiljuvatns frá Hellisheiðarvirkjun gæti nú þegar verið að hafa þau áhrif að líftími HE-31 styttest og endi innan 10 ára. Þetta þýðir að aukin niðurdæling CO₂ í Húsmúla samkvæmt sviðsmynd 1 hefur út af fyrir sig ekki áhrif á framtíð vinnsluholunnar til lengri tíma lítið. Hins vegar ætti að leggja áherslu á eftirlit með holum HE-48 og HE-44 til að auka skilning á mögulegum áhrifum aukinnar niðurdælingar CO₂ í Húsmúla á orkuvinnslu úr þessum holum.

Almennt má segja að allar sviðsmyndir forðafraeðilíkansins, sem voru keyrðar til að spá fyrir um viðbrögð geymslugeymisins við niðurdælingu CO₂ í djúpkerfi, greini minni háttar breytingar í djúpkerfinu á Hellisheiði vegna niðurdælingarinnar. Niðurstöður benda til að það muni hvorki hafa áhrif á orkuframleiðslu í Hellisheiðarvirkjun né á efnasamsetningu vökva í djúpkerfinu til lengri tíma (30 ár).



Mynd 8.12: Samanburður niðurdælingarsviðsmynda 1, 2 og 3 fyrir djúpkertið (1600 m u.s.) eftir 30 ár af niðurdælingu í djúpkerti með tilliti til hámarksdreifingar CO₂ hlaðna niðurdælingarvökvans, leysnibindingar og hita- og þrýstingsbreytinga.

Heildarniðurstöður líkanareikninga vegna niðurdælingar CO₂ í djúpkerfið

Heildarniðurstöður líkanareikninga út frá niðurdælingarsviðsmyndum 1, 2 og 3 fyrir djúpkerfið (sjá kafla 8.4.2) eru teknar saman í **töflu 8.2**. Eins og fyrr segir eru útreikningar gerðir fyrir flæðireikninga þar sem engin efnahvörf eiga sér stað og sýnir líkanið því hámarksdreifingu CO₂ þar sem ekkert CO₂ er bundið í steindir. Hámarksflatarmál (áætlað út frá hámarksflatarmáli þar sem styrkur CO₂ er meiri en 0,1%) og meðalflatarmál dreifingar CO₂-hlaðna niðurdælingarvökvans í djúpkerfinu er nánar tiltekið, hámarksstyrkur CO₂ á niðurdælingarsvæðinu (% CO₂ í vökva reiknað út frá massa) og hámarksrúmmál bergs sem niðurdælingarvökvinn kemst í snertingu við. Hámarksrúmmál bergs nýtist jafnframt til að reikna áætlaða geymslugetu ásamt áætluðu poruhlutfalli bergsins og eðlisþyngd karbónatsteinda. Loks er tryggt að geymsla CO₂ takmarkist við djúpkerfið með því að reikna út þrýstun milli hlutþrýstings CO₂ í niðurdælingarvökvannum og vatnsþrýstings í geymslugeyminum. Niðurstöður líkanareikninga má finna í **viðauka 1**.

Tafla 8.2: Niðurstöður líkanareikninga út frá mismunandi niðurdælingarsviðsmyndum fyrir djúpkerfið. Hámarksstyrkur CO₂ í vökvafasa, meðalflatarmál og hámarksflatarmál dreifingar niðurdælingarvökvans í djúpkerfi, hámarksrúmmál bergs áætlað út frá rúmmáli þess bergs sem kemst í snertingu við niðurdælingarvökvann og áætluð geymslugeta.

Niðurdælingar-sviðsmynd	Meðaltal flataramáls (km ²)	Hámarks flatarmál (km ²)	Hámarks styrkur CO ₂ (%)	Hámarks rúmmál bergs (km ³)	Áætluð geymslugeta (MtCO ₂)	Geymsla CO ₂ takmarkast við djúpkerfið
1	5,9	6,2	0,3	5,4	650	✓
2	9,5	10,4	0,05	10,0	1.200	✓
3	11,1	11,8	0,17	12,0	1.400	✓

8.4.3 Vöktun og mótvægisáðgerðir

Gert er ráð fyrir stýringu og vöktun niðurdælingar CO₂ í millikerfi og djúpkerfi geymslusvæðisins á Hellisheiði þegar starfsemi hefst. Fjallað er nánar um stýringar- og vöktunaráætlun í kafla 13.2. Helstu þættir sem verða vaktaðir og mótvægisáðgerðir til að draga úr eða bæta fyrir áhrif á geymslugeymi vegna niðurdælingar CO₂ í millikerfi og djúpkerfi á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði eru eftirfarandi:

- Þegar niðurdæling á CO₂ hefst á Hellisheiði verða gasflæðimælingar endurteknar. Þannig er fylgst með því hvort flæði CO₂ um yfirborð aukist á áhrifasvæðinu miðað við mælingar áður en framkvæmd hófst.
- Vöktunarholur sem ná til millikerfisins og grunnvatnskerfisins verða staðsettar í nokkurri fjarlægð frá niðurdælingarholum í átt að Engidal til að tryggja öryggi vatnsverndarsvæðisins og til að sannreyna niðurstöður líkanreikninga.
- Ef vöktunarniðurstöður sýna meiri áhrif niðurdælingar CO₂ en var spáð verður forðafraeðilikanið uppfært með hliðsjón nýjum upplýsingum og unnin ný spá um dreifingu CO₂. Ef nýir líkanreikningar sýna að búast megi við neikvæðum áhrifum á grunnvatn eða geymslugeyminn, þá þarf að endurskoða vöktunaráætlunina og fyrirhugaða staðsetningu niðurdælingarhola.

- Þó aukin niðurdæling CO₂ í Húsmúla sé ekki talin hafa áhrif á framtíð vinnsluholur ON á Skarðsmýrarfjalli (HE-31, HE-48 og HE-44) verður áfram lögð áhersla á eftirlit með þessum holum svo hægt sé að bregðast við ef breytinga er vart.
- Verði vart við meiri áhrif niðurdælingar CO₂ en var spáð eða leka CO₂ til yfirborðs verða gerðar ráðstafanir til úrbóta sem byggja á viðbragðsáætlun og vöktunaráætlun. Ráðstafanir eru útfærðar í skrefum eftir alvarleika. Í fyrsta skrefi er stuðst við frekari vöktun, sem lýst er í vöktunaráætlun. Í framhaldi eru gerðar breytingar á rekstrarlegum stikum (t.d. þrýstingi eða flæði) á meðan orsök leka er könnuð. Sé orsök leka óþekkt er niðurdæling stöðvuð tímabundið og niðurdælingarhola skoðuð og hugsanlega gert við hana. Sé viðgerð útilokuð gæti reynst nauðsynlegt að loka holunni og færa niðurdælingu í aðrar holur, eða bora nýja.

8.5 Niðurstaða umhverfismats

Niðurdæling á CO₂ og H₂S úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar í djúpkerfi

Gert er ráð fyrir að Carbfix muni dæla niður í djúpkerfi í Húsmúla gasi sem fangað verður úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar frá núverandi og nýrri hreinsistöð ON við virkjunina, samtals allt að 47.000 tonn CO₂ á ári og allt að 11.000 tonn H₂S á ári. Aukið magn af CO₂ og H₂S mun ekki krefjast aukinnar niðurdælingar á vatni í djúpkerfið heldur mun gasið verða leyst í því þétti- og skiljuvatni sem nú þegar er dælt í niðurdælingarholur ON á svæðinu.

Forðafræðilíkan var nýtt til að spá fyrir um dreifingu CO₂ frá niðurdælingu allt að 47.000 tonna/ári í 30 ár í djúpkerfi geymslusvæðis Carbfix á Hellisheiði. Skoðaðar voru þrjár sviðsmyndir miðað við hvaða niðurdælingarholur ON yrðu notaðar. Niðurstöður forðafræðilíkansins fyrir allar þrjár sviðsmyndirnar um mögulega hámarksdreifingu á niðurdældu CO₂ hlöðnu vatni í jarðlögum, leysnibindingu CO₂ og hita- og þrýstingsbreytingar, eftir niðurdælingu CO₂ í millikerfi í 30 ár sýna að CO₂ er aflokað í djúpkerfinu og leysnibindingu er viðhaldið. Þá nýtur H₂S góðs af leysnibindingu og helst einnig í djúpkerfinu. Niðurdæling í djúpkerfi hefur lítil áhrif á heildarsamsetningu vökva sem fyrir er. Ekkert CO₂ mun berast í grunnvatn ofan 100 m.u.s. Áhrif á vatnsverndarsvæðið í Engidal eru því metin hverfandi. Væg þrýstingsaukning sem kemur fram í líkanreikningum er ekki talin skapa hættu á örvaðri jarðskjálftavirkni, sjá nánari umfjöllun um áhrif á jarðskjálftavirkni í kafla 10 og í viðauka 3.

Þegar tekið er tillit til grunnástands, viðmiða, mögulegra umhverfisáhrifa, fyrirhugaðrar vöktunar og mótvægisáðgerða á rekstartíma niðurdælingar á allt að 47.000 tonnum af CO₂ úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar árlega í djúpkerfi geymslusvæðis á Hellisheiði, eru áhrif á geymslugeymi millikerfis og djúpkerfis metin **óveruleg**.

Niðurdæling á CO₂ úr andrúmslofti frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði í millikerfi

Fyrirhugað er að hefja niðurdælingu á allt að 59.000 tonnum árlega sem fangað verður úr andrúmslofti frá Orca og Mammoth lofthreinsiverum Climeworks og þróunarmiðstöð í lofthreinsitækni og dælt í millikerfi í Jarðhitagarði á 350-700 m dýpi, neðan efra grunnvatnskerfis en ofan háhitakerfisins.

Forðafræðilíkan var nýtt til að spá fyrir um dreifingu CO₂ frá niðurdælingu allt að 359.000 tonna/ári í 30 ár í millikerfi á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði. Skoðaðar voru þrjár meginsviðsmyndir miðað við á hvaða borsvæðum niðurdælingin yrði. Niðurstöður líkanreikninga um mögulega hámarksdreifingu á niðurdældu CO₂ hlöðnu vatni í jarðlögum, leysnibindingu CO₂ og hita- og þrýstingsbreytingar eftir niðurdælingu CO₂ í millikerfi í 30 ár er að niðurdælingarvökvi dreifist ekki til brunnsvæðis vatnsbólansins í Engidal. Líkanið sýnir einnig að leysnibindingu verður alltaf viðhaldið. Dreifing CO₂ frá niðurdælingu í millikerfi er talin algjörlega aðskilin frá efri grunnvatnslögum og því

ekki talin hafa áhrif á vatnsverndasvæðið í Engidal. Allar sviðsmyndir sýna að tryggt verður að geymsla CO₂ takmarkist við millikerfið og að CO₂ berist því hvorki í grunnvatnskerfið né í djúpkerfi.

Búast má við staðbundinni hitalækkun næst niðurdælingarholum þar sem niðurdælingarvökvinn er kaldari en bergið í kring og áhrif þrýstingsbreytinga í millikerfinu verða í átt að mörkum brunnsvæðisins, en gætir lítillega í efri grunnvatnslögum og djúpkerfi. Litlar líkur eru því taldar á að hita- og þrýstingsbreytingar hafi áhrif á vatnsvinnslu eða jarðhitavinnslu.

Líkanreikningar sýna að leysnibinding CO₂ helst í skilgreindum geymslugeymi og því ekki búist við að CO₂ uppleyst í vatni eða á gasformi geti streymt út fyrir millikerfið og upp til yfirborðs.

Áætluð geymslugeta sviðsmyndar 1 sýnir að fræðilega væri hægt að steinrenna allt að 923 milljón tonn CO₂ með niðurdælingu í millikerfi. Með niðurdælingu CO₂ í niður í millikerfi til geymslu í jarðlögum verður dregið úr styrk þessarar gróðurhúsalofttegundar í andrúmslofti og komið í veg fyrir neikvæð áhrif á loftslag.

Þegar tekið er tilliti til grunnástands, viðmiða, mögulegra umhverfisáhrifa, fyrirhugaðrar vöktunar og mótvægisáðgerða á rekstrartíma niðurdælingar Carbfix á allt að 59.000 tonnum sem fangað verður úr andrúmslofti CO₂ á Hellisheiði árlega í millikerfi í 30 ár eru áhrif á geymslugeymi millikerfis og djúpkerfis metin **óveruleg**.

Niðurdæling á CO₂ úr andrúmslofti frá nýjum aðilum eða frá nýrri starfsemi á athafnasvæði ON, eða flutt á staðinn til niðurdælingar í millikerfi.

Núverandi áform Carbfix gera einnig ráð fyrir niðurdælingu á allt að 300.000 tonnum af CO₂ á ári úr andrúmslofti frá nýjum aðilum eða frá nýrri starfsemi á athafnasvæði ON, eða flutt á staðinn til niðurdælingar í millikerfi. Dælt verður niður í nýjar holur á borsvæðum í Jarðhitagarði, Sleggjubeinsdal, Húsmúla, Þrengslum og við Gráuhnúka.

Hér að framan er greint frá niðurstöðum varðandi umhverfismat niðurdælingar á allt að 59.000 tonnum af CO₂ á ári frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði. Þar kemur fram að forðafræðilíkan var nýtt til að spá fyrir um dreifingu CO₂ miðað við hámarksniðurdælingu 30 ár í millikerfi á geymslusvæði Carbfix, sem er mun meira magn eða allt að 359.000 tonn/ári. Það er því allt CO₂ frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði ásamt áætluðu CO₂ frá nýjum aðilum, nýrri starfsemi á athafnasvæði ON, eða flutt á staðinn til niðurdælingar. Því er vísað til framangreindrar niðurstöðu um umhverfismat niðurdælingar frá þessum niðurdælingarverkefnum er sú sama.

Þegar tekið er tilliti til grunnástands, viðmiða, mögulegra umhverfisáhrifa, fyrirhugaðrar vöktunar og mótvægisáðgerða á rekstrartíma niðurdælingar Carbfix á allt að 300.000 tonnum CO₂ á Hellisheiði árlega frá nýjum aðilum í millikerfi í 30 ár eru áhrif á geymslugeymi millikerfis og djúpkerfis metin **óveruleg**.

9 Grunnvatn

9.1 Matsspurningar

Í mati á áhrifum niðurdælingar CO₂ til geymslu í jarðlögum á grunnvatn á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði er leitast við að svara eftirfarandi matsspurningum:

- Hvaða þættir framkvæmdar geta skapað hættu vegna vatnsverndar og hversu mikil er sú hættu?
 - Verða framkvæmdir á fjarsvæði, grannsvæði eða brunnsvæði vatnsverndarsvæða?
 - Hefur verið tekið tillit til ákvæða samþykktar um verndarsvæði vatnsbóla höfuðborgarsvæðisins nr. 555/2015?
 - Getur vatnsnotkun vegna niðurdælingar haft áhrif grunnvatn?
- Hvaða þættir tengdir framkvæmd gætu orsakað mengun vatns og hver yrðu áhrif slíkrar mengunar á vatn?
 - Er hættu á mengun vatns vegna framkvæmdar/niðurdælingar CO₂?
 - Er hættu á mengun vatns vegna olíuleka frá tækjum við borun niðurdælingarhola og uppsetningu búnaðar?
 - Er hættu á mengun vatns vegna efna sem notuð eru við borun?
 - Er hættu á mengun grunnvatns ef CO₂ berst út frá niðurdælingarholum á rekstrartíma, t.d. ef fóðringar rofna?
- Hver geta áhrif framkvæmdar orðið á vatnsgæði?
 - Getur styrkur olíu í grunnvatni risið upp fyrir mörk ef lekur frá tækjum?
 - Getur styrkur efna í vatni farið yfir viðmiðunarmörk ef gashlaðið vatn berst í grunnvatn nærri niðurdælingarholu?

9.2 Rannsóknir, fyrirliggjandi gögn og viðmið

Sérfræðiverkefni um grunnvatn og vatnafræðilegar aðstæður á athugunarsvæðinu var unnið af sérfræðingum Orkuveitu Reykjavíkur fyrir Carbfix, í samræmi við samþykka matsáætlun.²⁸

Gögn og viðmið sem lögð eru til grundvallar umhverfismati eru eftirfarandi.

- Sigrún Tómasdóttir, 2022. Grunnvatn á Hellisheiði. Grunnástand og möguleg áhrif fyrirhugaðrar framkvæmdar Carbfix um geymslu CO₂ í jarðlögum á Hellisheiði. Orkuveita Reykjavíkur. **Viðauki 2.**
- Thomas Ratouis og Matt Villante, 2022. Model of the Injection of CO₂ at Hellisheiði. Possible Effects of the Proposed CO₂ Injection and Mineral Storage Operations. **Viðauki 1.**
- Verkfræðistofan Vatnaskil, 2015. Vatnsvernd á höfuðborgarsvæðinu. Greinargerð um heildarendurskoðun. Unnið fyrir Samtök Sveitarfélaga á höfuðborgarsvæðinu. Skýrsla nr. 15.04. febrúar 2015.
- Vatnaskil, 2019. Líkanreikningar til mats á áhrifum aukinnar vatnstöku við Engidalskvísl. Skýrsla 19.02.
- Verkfræðistofan Vatnaskil, 2020. Höfuðborgarsvæði. Árleg endurskoðun rennislíkans. Framgangur endurskoðunar 2020. Skýrsla nr. 20.12

²⁸ Sigrún Tómasdóttir, 2022

- Vinnsluskýrslur Hellisheiðar: Dæmi: Einar Gunnlaugsson, 2013. Hellisheiði: vinnsluskýrsla 2013: afl, vatnsborð, vinnsla, efnafraði: yfirlit yfir rannsóknir. Orkuveita Reykjavíkur.
- Umhverfisskýrslur Orkuveitu Reykjavíkur.
- Bergur Sigfússon og Bjarni Reykr Kristjánsson. 2018. Losun jarðhitavats í grunnar borholur við Hellisheiðarvirkjun og áhrif þeirrar losunar á vatnsgæði grunnvatns í nágrenni virkjunarinnar. Minnisblað 29.01.2018. Orkuveita Reykjavíkur
- Lög um rannsóknir og nýtingu auðlinda í jörðu nr. 57/1998.
- Lög um hollustuhætti og mengunarvarnir nr. 7/1998.
- Reglugerð um varnir gegn mengun vatns nr. 796/1999.
- Reglugerð nr. 533/2001 um breytingu á reglugerð nr. 796/1999.
- Reglugerð um losun frá atvinnurekstri og mengunarvarnaeftirlit nr. 550/2018.
- Samþykkt um verndarsvæði vatnsbóla höfuðborgarsvæðisins nr. 555/2015.
- Starfsleyfi ON fyrir Hellisheiðarvirkjun.
- Skilmálar deiliskipulags Hellisheiðarvirkjunar fyrir framkvæmdir virkjunarsvæðinu.

Skýrsla sem sérfræðingar Orkuveitu Reykjavíkur tóku saman um grunnástand grunnvatns og möguleg áhrif framkvæmdar Carbfix og geymslu CO₂ í jarðlögum á Hellisheiði á grunnvatn byggir á fyrirliggjandi heimildum og gögnum sem safnað hefur verið á svæðinu, sjá **viðauka 2**. Í þessu samhengi er átt við grunnvatnslög ofan hins eiginlega jarðhitakerfis.

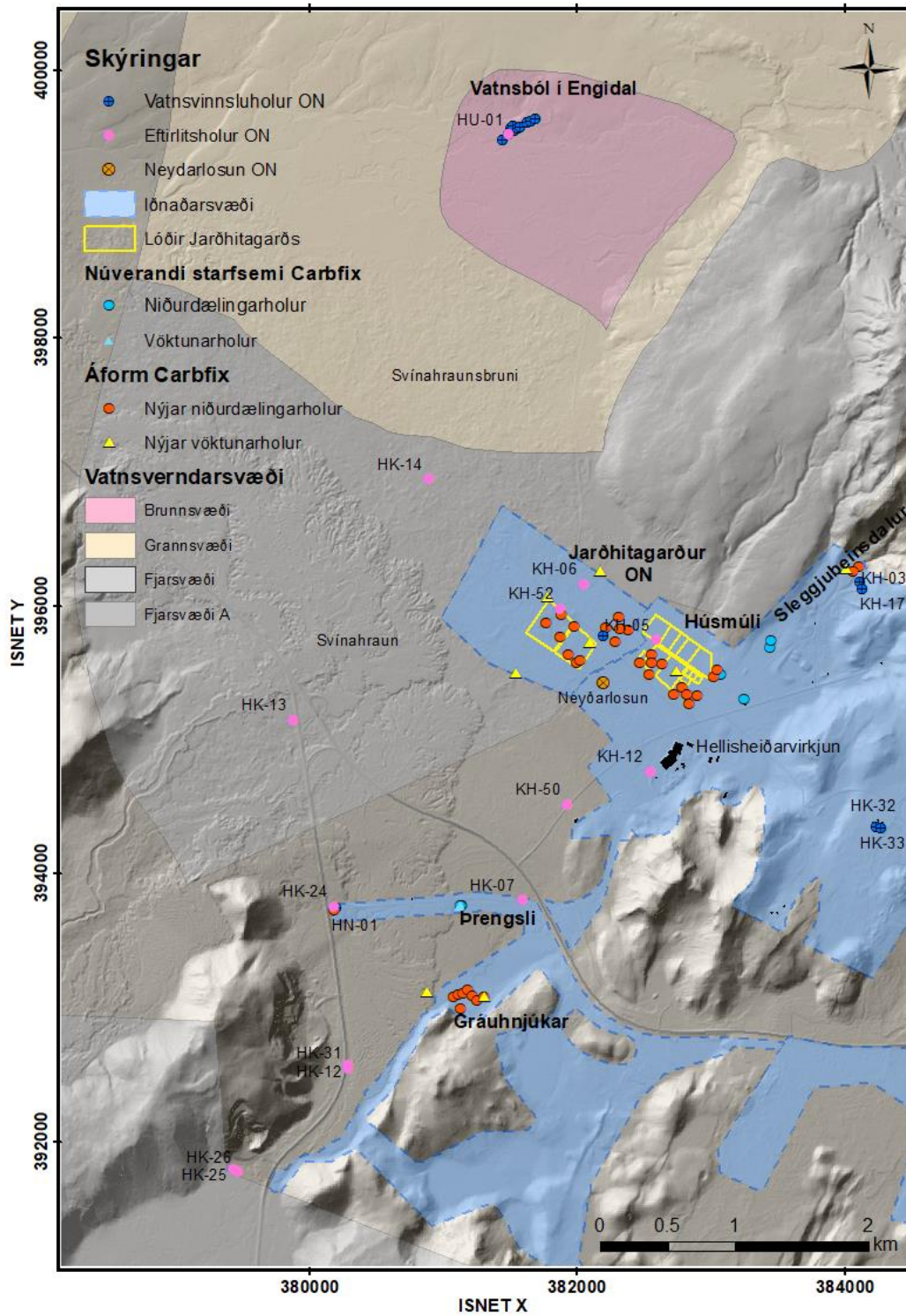
Umfjöllun um grunnástand grunnvatns og möguleg áhrif niðurdælingar og geymslu CO₂ í jarðlögum á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði byggir á framangreindri skýrslu. Jafnframt byggir mat á áhrifum niðurdælingar á efri grunnvatnslög á skýrslu sérfræðinga Carbfix um grunnástand geymslusvæðisins, forðafraðilíkangerð fyrir niðurdælingu á CO₂ í millikerfi og djúpkerfi, ásamt hugsanlegum breytingum sem framkvæmdinni fylgja á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði, sjá **viðauka 1**.

9.3 Grunnástand

Á virkjunarsvæði Hellisheiðarvirkjunar er lítið um vatn á yfirborði og er virkjunarsvæðið utan vatnsverndarsvæða samkvæmt Aðalskipulagi Ölfuss 2010-2022. Framkvæmdasvæði niðurdælingar á geymslusvæði Carbfix, er að hluta skilgreint sem fjarsvæði vatnsverndar í greinargerð um heildarendurskoðun vatnsverndar á höfuðborgarsvæðinu. Í gildandi deiliskipulagi eru skilmálar vegna starfsemi á svæðinu í samræmi við fjarsvæði vatnsverndar í samþykkt um verndarsvæði vatnsbóla höfuðborgarsvæðisins nr. 555/2015. Miklar upplýsingar eru til um grunnástand grunnvatns á svæðinu sem nýttar voru til þess að meta hvort niðurdæling CO₂ til geymslu í millikerfi og djúpkerfi geymslusvæðisins á Hellisheiði hafi áhrif á grunnvatn.

9.3.1 Núverandi vatnsöflun ON á Hellisheiði

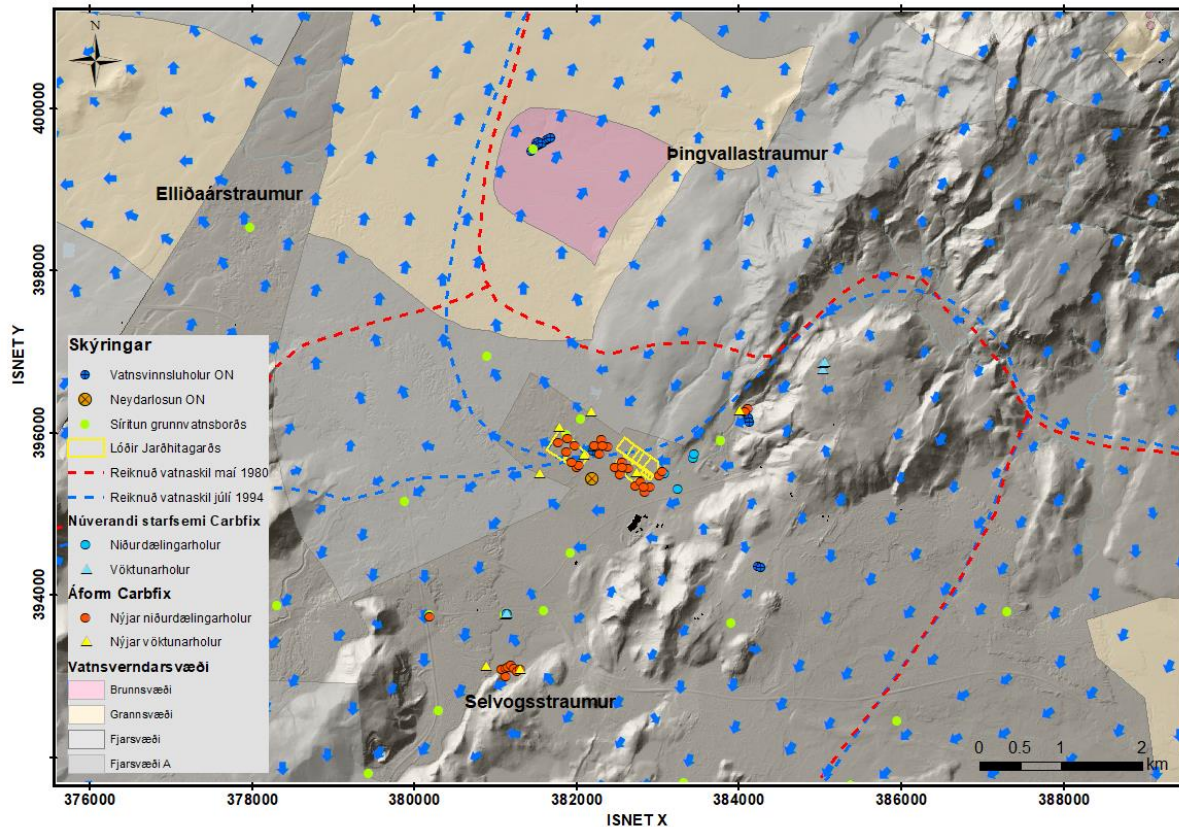
Kalt grunnvatn er unnið í miklu magni úr vatnsbólum ON í Engidal, í dag eru um 900 L/s nýttir og er í gildi nýtingarleyfi fyrir 2.000 L/s upptekt. Vinnsluholur þar eru níu talsins, HU-01 til HU-09. Stærstur hluti vatnsins er hitaður upp og fluttur til höfuðborgarsvæðisins sem hitaveituvatn en auk þess er kalt vatn nýtt innan virkjunarinnar, sem neysluvatn á svæðinu og í Jarðhitagarði ON. Vatnsbólið í Engidal er einnig varavatnsból fyrir höfuðborgarsvæðið. Vatnsverndarsvæði eru skilgreind í kringum vatnsbólið og eru þau sýnd á **mynd 9.1**. Einnig er til staðar borvatnsveita ON sem nýtir tvær vinnsluholur í Sleggjubeinsdal (KH-03 og KH-17) til að afla skolvatns fyrir boranir á Skarðsmýrarfjalli og Hellisheiði, og tvær vinnsluholur á teig 7 (HK-32 og HK-33) sem nýttar eru til uppbotarborana í Hverahlíð svo dæmi séu tekin. Vatn fyrir núverandi niðurdælingu Carbfix í Þrengslum fyrir CO₂ frá Orca lofthreinsiverinu er fengið úr holum HN-01 og HK-24. Staðsetning allra vatnstökuhola er sýnd á **mynd 9.1**.



Mynd 9.1: Staðsetning vatnsbólans í Engidal, vatnstökuhola ON ásamt staðsetningu vöktunarhola ON í nágrenni Helligheiðarvirkjunar þar sem efnasýni eru tekin reglulega til þess að vakta áhrif virkjunarinnar á grunnvatn á svæðinu. Á kortinu er einnig lega vatnsverndarsvæða, staðsetning neyðarlosunar ON fyrir skiljuvatn frá Helligheiðarvirkjun ásamt núverandi og fyrirhuguðum niðurdælingar- og vöktunarholum Carbfix. Staðsetningar fyrirhugaðra hola eru ekki endanlegar.

9.3.2 Vatnajarðfræði og grunnástand vatns

Fyrirhugað CO₂ geymslusvæði Carbfix liggur í nálægð við vatnaskil þriggja grunnvatnsstrauma; Þingvallastraums, Selvogsstraums og Elliðaárstraums (**mynd 9.2**). Vatnajarðfræði á svæðinu er nokkuð flókin og hafa misgengi, grafnar móbergsmýndanir og ummyndun áhrif á stöðu grunnvatns og streymi þess. Mæld grunnvatnshæð í borholum gefur til kynna að hæð grunnvatnsborðs sé í um 230-240 m y.s. við Kolviðarhól. Vestar fellur hæð grunnvatnsborðs verulega, en í Svínahrauni mælist hæð grunnvatnsborðs á tiltölulega þröngu hæðarbili, um 170-175 m y.s. á mjög stóru svæði, sem teygir sig til vesturs að Lyklafelli og til norðurs að borholu HK-20 á Mosfellsheiði.

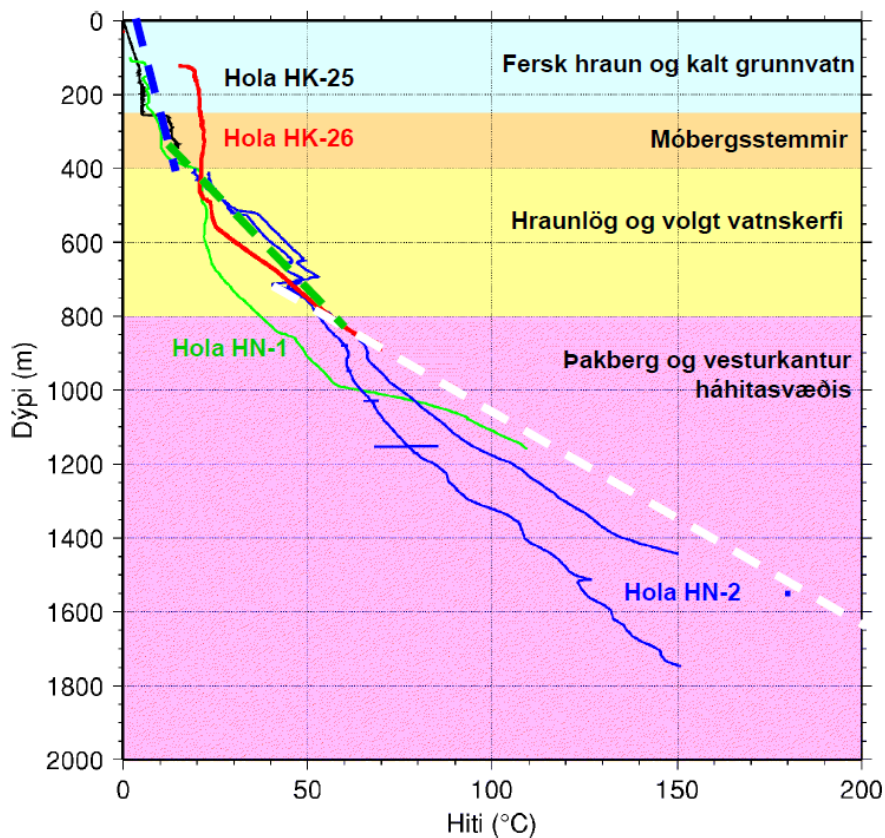


Mynd 9.2: Breytileiki í stöðu grunnvatnatnaskila á svæðinu eins og hún reiknast í grunnvatnslíkani Vatnaskila. Rauða brotalínan sýnir vatnaskilin þegar þau liggja norðarlega (maí 1980) og bláa línan sýnir þegar þau liggja sunnarlega (júlí 1994). Örvar sýna rennslisstefnu grunnvatns miðað við vatnaskil í júlí 1994. Á kortinu er einnig sýnd staðsetning vatnsvinnsluhola ON, staðsetning hola þar sem síritun grunnvatnsborðs fer fram og staðsetning neyðarlosunar fyrir skiljuvatn frá Hellisheiðarvirkjun. Staðsetning á núverandi og fyrirhuguðum niðurdælingar- og vöktunarholum Carbfix er einnig sýnd. Staðsetningar fyrirhugaðra hola eru ekki endanlegar.

Með grunnvatnslíkani Verkfræðistofunnar Vatnaskila hefur verið sýnt fram á að lega vatnaskila á svæðinu í nágrenni Hellisheiðarvirkjunar geti verið töluvert breytileg eftir því hver vatnsstaðan er hverju sinni. Þannig getur verið mismunandi hvort úrkoma sem fellur á svæðið sem nær yfir breytileika vatnaskilanna leiti til suðvesturs í Selvoginn, til norðausturs í áttina að Engidalskvísl eða til vesturs á vatnasvið Elliðaáa. Á **mynd 9.2** má sjá dæmi um þennan breytileika. Þar er bæði sýnd lega vatnaskila þegar þau liggja norðarlega (maí 1980) og þegar þau liggja sunnarlega (júlí 1994) samkvæmt líkaninu. Örvar sýna rennslisstefnu grunnvatns miðað við vatnaskil í júlí 1994. Ef vatnaskilin færast til breytist stefna grunnvatnsrennslis á afmörkuðu svæði þar sem þau færast til norðurs. Töluverðar uppfærslur hafa verið gerðar á líkani Vatnaskila undanfarin ár. Gögn sýna að

munur á mældri og reiknaðri grunnvatnshæð er mestur þar sem skarpar breytingar verða á grunnvatnshæð, sem er tilfellið í nágrenni virkjunarinnar og innan Jarðhitagarðsins. Grunnvatnslíkanið er gert fyrir mjög stórt svæði og nær ekki að herma grunnvatnshæð í nágrenni við Helliðarvirkjun af mikilli nákvæmni. Því er óvissa um stöðu vatnaskila og rennissstefnu grunnvatns á svæðinu.

Dýpri boranir í Þrengslum hafa sýnt fram á að efsta grunnvatnskerfið er aðskilið frá neðri lögum með þéttara móbergslagi. Neðan móbergslagsins er heitara grunnvatnskerfi, í þessari skýrslu nefnt millikerfi, sem er síðan aðskilið frá jarðhitageyminum sjálfum, í þessari skýrslu nefnt djúpkkerfi, með þéttara þakbergi sem er tilkomið vegna aukinnar háhitaummyndunar. Nánari skilgreiningu á millikerfi og djúpkkerfi er að finna í kafla 3.3.2. Vatn í millikerfinu hefur aðra efnasamsetningu heldur en efsta grunnvatnskerfið og er heitara. Á mynd 9.3 má sjá einfaldað jarðlagasnið úr Þrengslum ásamt hitamælingum. Þar má sjá að hitinn í efsta kerfinu er innan við 10°C en hitinn í millikerfinu er 20-60°C. Þó ekki séu til staðar djúpar holur innan Jarðhitagarðs eða norðar í Svínahrauni til þess að staðfesta útbreiðslu þéttara móbergslagsins til norðurs þá eru til upplýsingar frá nálægum holum, á borð við niðurdælingarholu HN-11 sem fylla upp í þau göt. Er það vegna þess að HN-11 er stefnuboruð í átt að Jarðhitagarði í sömu stefnu og fyrirhugaðar holur Carbfix í millikerfið. ÍSOR vann sneiðmyndir út frá mismunandi sjónarhornum sem sýna vel tiltækileika jarðfræði- og jarðefnafræðilegra gagna úr HN-11 þar sem fyrirhugað er að bora nýjar niðurdælingarholur Carbfix í Jarðhitagarði. Gögnin voru nýtt við líkangerð fyrir geymslugeyminn og geymslusvæðið. Einungis 1200 metrar skilja að holu HN-11 og fyrirhugaðrar niðurdælingarholu vestast á geymslusvæði Carbfix á því dýpi sem millikerfið er.



Mynd 9.3: Hitaferlar í borholum nærri Þrengslavegamótum (HN-01 og HN-02) og sunnan Lambafells (HK-25 og HK-26). Blár slitinn ferill táknar hitastigul í kalda grunnvatninu efst í staflanum, sá græni í volgu vatnskerfi á 400-800 m og sá hvíti í ummynduðu þakbergi háhitasvæðisins í Hengli (Grímur Björnsson og Hjalti Franzson, 2005).

Tekin hafa verið vatnssýni úr vöktunarholum við og í nágrenni Hellisheiðarvirkjunar árlega frá því fyrir gangsetningu virkjunarinnar til að fylgjast með áhrifum starfseminnar. Sýnin eru greind fyrir styrk heildarefna og snefilefna ásamt því að hitastig, sýrustig og leiðni er mælt. Á mynd 9.1 má sjá staðsetningu vöktunarholanna. Flestar holurnar eru innan við 300 m djúpar og gefa því mynd af efnasamsetningu efsta grunnvatnskerfisins. Sýni úr tveimur holum, HK-26 og HK-31, sem eru 855 m og 799 m djúpar og fóðraðar niður fyrir 400 m dýpi, gefa mynd af efnaástandi vatns millikerfisins. Niðurstöður efnagreininga nýjustu sýna sem tekin hafa verið sýna að styrkur efna í vöktunarholum er í öllum tilvikum undir neysluvatnsmörkum, þar sem þau eru skilgreind. Vísað er til töflu 1 í viðauka 2 varðandi niðurstöður efnagreininga úr einstökum vöktunarholum.

Starfsemi Hellisheiðarvirkjunar felur í sér losun vökva á yfirborði og í grunnar svelgholur undir ákveðnum kringumstæðum. Þá var skiljuvatni dælt niður í millikerfið í Þrengslum til skemmri tíma frá 2016-2018. Þessi losun hefur áhrif á grunnástand grunnvatns á svæðinu en tengist ekki niðurdælingu Carbfix á CO₂. Ekki hafa komið fram afgerandi vísbendingar um að losun affallsvatns frá Hellisheiðarvirkjun í grunnvatnslög ofan jarðhitakerfis sé að valda útbreiddri rýrnun á gæðum grunnvatns á svæðinu. Staðbundin áhrif, og stundum tímabundin, eru mjög líklega nærri losunarstöðum. Kísill (SiO₂), sulfat (SO₄), natríum (Na) og klóríð (Cl), eru þau aðalefni sem fyrst ættu að sýna breytingar ef áhrifa núverandi losunar frá Hellisheiðarvirkjun gætir í grunnvatni. Helstu breytingar sem orðið hafa á efnasamsetningu grunnvatns á svæðinu frá gangsetningu Hellisheiðarvirkjunar eru eftirfarandi:

- Styrkur kísils hefur farið örlítið hækkandi í nokkrum holum.
- Styrkur sulfats hefur hækkað lítillega í nokkrum holum.
- Töluverður breytileiki er í styrk klóríðs í tveimur holum. Líklegra er að það tengist nálægð við þjóðveg 1 en rekstri virkjunarinnar.
- Styrkur sulfats, kísils og natríum hefur verið nokkuð sveiflukenndur í einni holu sem er sunnan við virkjunina.

9.3.3 Fyrirhuguð vatnsnotkun vegna niðurdælingar og efnasamsetning vatns

Eins og greint er frá í kafla 6.4 hér að framan ráðgerir Carbfix að semja við ON um afhendingu á vatni til niðurdælingar. Niðurdæling CO₂ með Carbfix tækninni krefst vatns til að leysa upp CO₂ og tryggja örugga niðurdælingu. Vatnspörf fyrir niðurdælingarverkefni Carbfix er allt að 250 L/s af vatni. Staðsetning vatnsöflunar er undir ON komin, sjá nánar í kafla 6.4. Vatnsöflun er tengd framkvæmd á vegum ON sem er jafnframt ábyrgt fyrir að hún hafi hlotið viðeigandi málsmeðferð hvað varðar umhverfismats- og leyfisferli. ON er með nýtingaleyfi fyrir vatnstöku í Engidal fyrir Hellisheiðarvirkjun og mun sækja um nýtingarleyfi fyrir stöðugri upptekt úr borvatnsveitu eða nýjum holum eftir því sem við á. Vatnsöflun er því ekki til umfjöllunar í þessu umhverfismati. Hér á eftir er gerð grein fyrir uppruna og eiginleikum þess vatns sem nýtt verður í niðurdælingarverkefnum Carbfix.

Kæliturnavatn: Milli 135 og 165 L/s af vatni gætu komið úr kæliturnum Hellisheiðarvirkjunar, sem er að uppruna úr vatnsveitu Hellisheiðarvirkjunar í Engidal, ásamt þéttivatni. Nýting á þessu vatni, sem annars færi til uppgufunar eða í grunnar svelgholur, krefst ekki aukinnar upptektar úr grunnvatnsgeymi.

Önnur vatnstaka: Til greina kemur að bora nýjar vatnstökuholur sérstaklega til verkefnisins eða að nýta núverandi vatnsöflunarkosti. Í því samhengi hafa bæði borvatnsveita í Sleggjubeinsdal og vatnstökuholur í Þrengslum verið til umræðu. Allt að 80 L/s gætu komið úr holum KH-03 og KH-17 í Sleggjubeinsdal, og allt að 45 L/s úr holu HK-24 í Þrengslum. Þá kemur greina að boruð verði ný vatnstökuholu í nágrenni við HK-24 sem gæti gefið allt að 80 L/s.

Styrkur efna úr þeim vatnsstraumum sem verða nýttir til niðurdælingar er samkvæmt greiningu undir leyfilegum hámarksstyrk skv. neysluvatnsreglugerð nr. 536/2001. Þörungum í hringrásarvatni kæliturna er haldið í skefjum með klóríblöndun sem hefur tímabundin áhrif á efnasamsetningu vatns frá kæliturnum þannig að styrkur Na, Cl og SO₄ og leiðni í vatninu getur farið yfir neysluvatnsviðmið. Íblöndunin er í samræmi við starfsleyfi virkjunarinnar. Nánar er greint frá niðurstöðum efnagreininga á vatnsstraumum til niðurdælingarverkefna í töflu 2 í **viðauka 2**.

9.4 Umhverfisáhrif

9.4.1 Áhrif á framkvæmdatíma

Áhrifasvæði framkvæmdarinnar á yfirborði nær yfir jarðhitagarð ON, Húsmúla, Sleggjubeinsdal, Þrengsli og niðurdælingarsvæði ON við Gráuhnúka. Svæðið er allt utan skilgreindra vatnsverndarsvæða og innan skilgreinds iðnaðarsvæðis (sjá **mynd 9.1**). Endurskilgreining afmörkunar vatnsverndarsvæðis í Engidal er í skoðun, samkvæmt upplýsingum frá OR, þar sem nýlegir líkanreikningar Verkfræðistofunnar Vatnaskil sýndu að við 2000 L/s stöðuga upptekt geta aðrennslissvæði vatnsbólsins náð að Jarðhitagarði ON og inn í Innstadal.

Mengunaróhapp í Jarðhitagarði á framkvæmdatíma niðurdælingar gæti mögulega borist í vatnsbólið í Engidal. Þetta gæti t.d. verið vegna olíuleka frá tækjum við borun niðurdælingarhola eða við uppsetningu tækja. Ekki er talin hætta á mengun vatns vegna efna sem notuð eru við borunina sjálfa.

9.4.2 Áhrif á rekstrartíma

Fyrirhuguð niðurdæling Carbfix á CO₂ verður annars vegar í djúpkerfi geymslusvæðisins frá hreinsistöðvum Helligshéidarvirkjunar og hins vegar í millikerfið frá lofthreinsiverum, þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni og til framtíðar frá nýjum aðilum (sjá kafla 5.1).

Áhrif niðurdælingar CO₂ í djúpkerfi á grunnvatn og vatnsból í Engidal

Niðurdælingarholur í djúpkerfi eru holur HN-14 og HN-16 við Húsmúla sem eru um og yfir 2000 m djúpar og fóðraðar niður á tæplega 700 m dýpi. Sömu holur eru einnig nýttar af ON til niðurdælingar affallsvatns frá Helligshéidarvirkjun. Niðurdælingarholur í millikerfið verða allt að 700-1000 m djúpar og fóðraðar niður á um 300-350 m dýpi.

Með niðurdælingu CO₂ og H₂S frá hreinsistöð Helligshéidarvirkjunar í djúpkerfi, ásamt vökva sem einnig á uppruna sinn í jarðhitageyminum, verður því skilað aftur ofan í djúpkerfið. Niðurdælingarholur verða fóðraðar niður fyrir efri grunnvatnslög og grunnvatnskerfi millikerfisins, sjá **mynd 3.4** hér að framan. Eins og fram kemur í kafla 8.4.2 hér að framan þá er niðurdæling í djúpkerfi ekki talin geta haft áhrif á efri grunnvatnslög.

Til þess að varpa betra ljósi á rennslisleiðir niðurdælingarvatnsins og áhrifasvæði þess hafa sérfræðingar Carbfix byggt upp forðræðilíkan af geymslugeyminum. **Mynd 8.11** í 8. kafla sýnir samanburð sviðsmynda 1, 2 og 3 fyrir grunnvatnskerfið (100 m u.s.) fyrir niðurdælingu CO₂ í djúpkerfi í 30 ár. Niðurstaðan er að óháð því um hvaða sviðsmynd er að ræða mun ekkert CO₂ berast í grunnvatnskerfi ofan þessa dýpis.

Áhrif niðurdælingar CO₂ í millikerfi á grunnvatn og vatnsból í Engidal

Niðurdælingarholur í millikerfi eru fóðraðar frá efstu grunnvatnslögum og ekki nógu djúpar til að ná ofan í djúpkerfið, sjá **mynd 3.4**. Vatnið sem notað verður til niðurdælingar er kalt og er gert ráð fyrir að það uppfylli kröfur um neysluvatnsviðmið. Þegar búið er að leysa CO₂ í vatninu eykst eðlisþyngd þess, þannig að vatnið ætti ekki að leita upp eins og tilfellið er með niðurdælingu á heitu, eðlisléttara

vatni í kaldara grunnvatnskerfi. Gengið er út frá því að niðurdæling í millikerfi eigi með þessu fyrirkomulagi hvorki að hafa áhrif á efri grunnvatnslög né á djúpkerfið og að áhrifin einskorðist við vatnið í millikerfinu. Niðurdæling á þetta miklu magni af vatni breytir hins vegar þrýstingsaðstæðum í grunnvatnskerfi og gæti vatn mögulega leitað upp á við ef lekt er ekki nægileg.

Til þess að varpa betra ljósi á rennislleiðir niðurdælingarvatnsins og áhrifasvæði þess hafa sérfræðingar Carbfix byggt upp forðafraeðilíkan fyrir geymslugeyminn (**viðauki 1**). Í kafla 8.4.1 hér að framan kemur fram að niðurdæling CO₂ í millikerfi geymslusvæðisins er ekki talin hafa áhrif á efri grunnvatnskerfi eða vatnsveitu/vatnsból ON í Engidal. Í öllum sviðsmyndum fyrir 30 ára niðurdælingu CO₂ í millikerfi sýna spár líkansins að niðurdælingarvökvinn muni ekki ná að dreifast til brunnsvæðis vatnsverndarsvæðisins í Engidal, sjá **myndir 8.8 og 8.11**. Jafnvel sviðsmynd 1, þar sem niðurdæling verður nær öll í Jarðhitagarði og næst Engidal, þá verður vökvinn ávallt í minnst 0,5 km fjarlægð frá brunnsvæðinu.

Fyrir liggur að niðurstöður líkanreikninga fyrir CO₂ geymslugeymi eru mjög háðar þeim gildum sem valin eru fyrir t.d. lekt, poruhluta og hlutfall sprungna í berginu. Þar sem þessi gildi eru metin en ekki að fullu þekkt geta líkanreikningar á þessu stigi aldrei gefið fullkomlega áreiðanlegt svar um áhrifasvæði niðurdælingarinnar. Vegna þessarar óvissu um rennislleiðir og rennlishraða á svæðinu sem og óvissu um hversu mikill aðskilnaður er á milli millikerfis og efri grunnvatnslaga, sérstaklega í Jarðhitagarði, þarf að staðsetja vöktunarholur í efra grunnvatnskerfi og millikerfi þannig að þær gefi skýra sýn á dreifingu ferilefna og efnastyrks, sérstaklega á átt til Engidals. Auk vöktunar á grunnvatni er flæði CO₂ um yfirborð einnig vaktað að á geymslusvæði, sjá umfjöllun um mögulegt streymi CO₂ til yfirborðs, áhrif þess og mótvægisaðgerðir í kafla 8.4.

Í kafla 9.3.1 hér að framan kemur fram að í Engidal er mikilvægt vatnsöflunarsvæði og vatnsból fyrir Hellisheiðarvirkjun og aðra starfsemi á virkjunarsvæðinu og í Jarðhitagarði. Auk þess er vatnsbólið í Engidal varavatnsból höfuðborgarsvæðisins. Það þarf því að horfa til mögulegra áhrifa niðurdælingar CO₂ á geymslusvæði Carbfix á vatnsbólið til lengri tíma, m.a. að teknu tilliti til áforma um aukna vatnsvinnslu í Engidal.

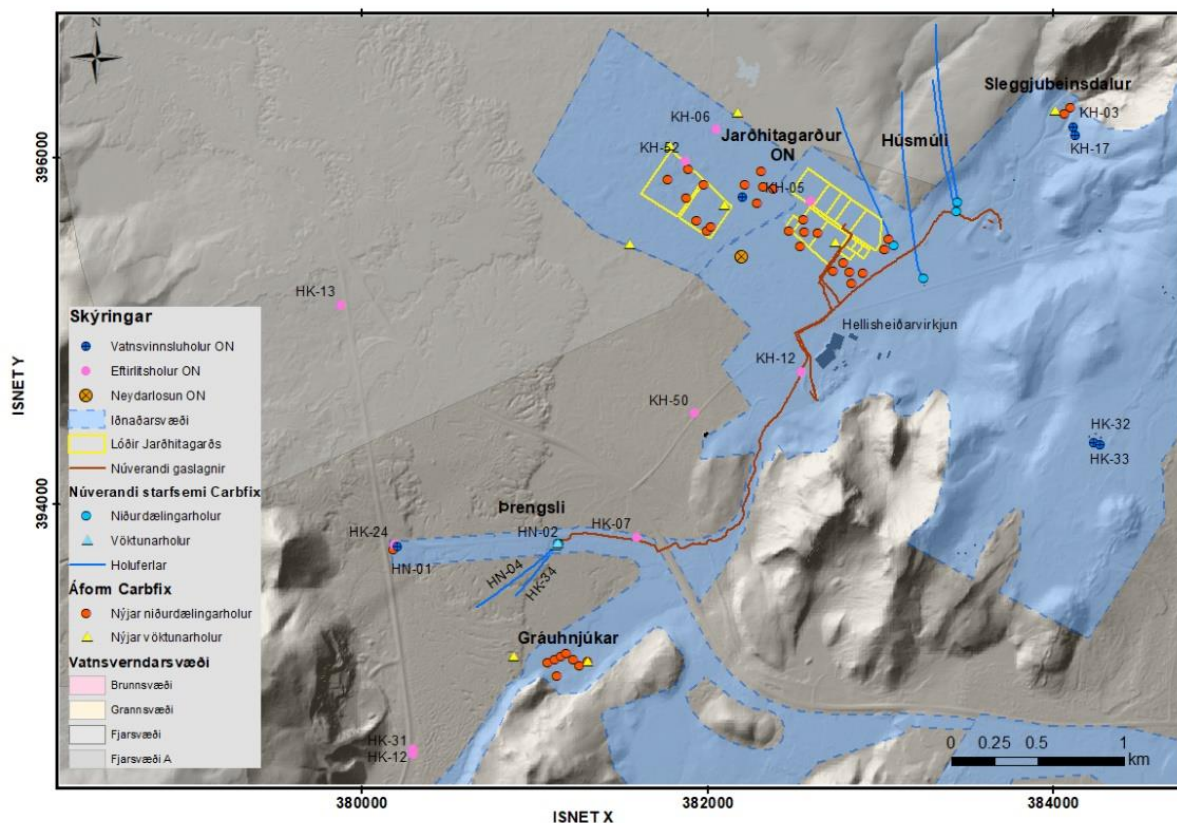
Fyrirhuguð notkun Carbfix á vatni frá kæliturnum gerir það að verkum að vatn sem annars hefði verið fargað um grunnar svelgholur mun nú fara í dýpri niðurdælingu (300-800 m dýpi). Má reikna með að þessi breyting hafi jákvæð áhrif á vatnsgæði á svæðinu með því að minnka losun þessa vatns í efstu grunnvatnslög. Hægt verður að fylgjast með hvaða áhrif þessi breyting hefur í vöktunarholu KH-50 en tímabundnir toppar í efnastyrk hafa sést í þeirri holu og gæti ástæða þeirra að hluta til verið losun á yfirfalli kæliturna í grunnar holur við Hellisheiðarvirkjun.

Eins og kemur fram í kafla 6.2.2 mun Climeworks nýta allt að 92 L/s af grunnvatni við föngun á CO₂ í þvottaturni Mammoth lofthreinsiversins. Það felst m.a. í því að endurnýta allt að 90 L/s af vatni frá kæliturnum Hellisheiðarvirkjunar og vatn úr kæliturni Mammoth, en þetta vatn á uppruna sinn í vatnsveitu ON við Engidalskvísl. Climeworks mun afhenda Carbfix CO₂ leyst í vatni til niðurdælingar í borholur á lóð Mammoth. Ferli í lofthreinsiverinu gera það að verkum að styrkur járn og ammóníum í vatninu, verður tímabundið yfir neysluvatnsviðmiðum í uppkeyrslu búnaðar þess. Heildarmagn lífræns kolefnis (TOC) eykst einnig. Miðað við útreikninga Climeworks verður styrkurinn kominn niður fyrir neysluvatnsviðmið eftir 90 klst. í rekstri. Lofthreinsiverið verður byggt upp í skrefum og því munu toppar í efnastyrk verða dreifðari og lægri. Því er ekki talin hætta á útbreiddum efnaáhrifum á grunnvatn vegna niðurdælingar CO₂ í millikerfi vegna þessa.

Fjöl margar rannsóknir hafa skoðað leysingu bergs vegna efnahvarfa við CO₂ hlaðið vatn og þá breytingu á efnasamsetningu grunnvatns sem því fylgir. Tilraunaniðurdæling Carbfix á CO₂ og H₂S í millikerfið í Þrengslum árið 2012 (sjá **viðauka 2**) þar sem dælt var niður í holu HN-02 (**mynd 9.4**)

sýndi að áhrif frá niðurdælingunni voru ekki merkjanleg í efri grunnvatnslögum. Niðurstöður tilraunaniðurdælingarinnar og áður framkvæmdra ferilefnaprófa í tengslum við hana sýndu að lektin í berginu er blanda af svo kallaðri matrixulekt, þar sem vatn flæðir hægt um holrými í berginu sjálfu, og sprungulekt sem flytur vökvu hraðar um kerfið. Þannig mátti sjá tvo toppa í ferilefnastyrk, sá fyrri (um 3% vökvans eftir um 2 mánuði) var tilkominn vegna vatns sem flæddi um sprungur og sá síðari (yfir 95% vökvans eftir 13 mánuði) vegna vatns sem flæddi hægt í gegnum porur í berginu. Niðurstöður sýndu tímabundna breytingu á styrk kalsíum (Ca), magnesíum (Mg), og járns (Fe) sem og á styrk natríum (Na) og kalíum (K) í vöktunarholu HN-04 en með tímanum féllu þær út sem Ca, Mg og Fe-karbónöt.²⁹ Þannig var auðgun á Ca, Mg og Fe í vatninu ekki varanleg heldur tímabundin. Niðurdælingin lækkaði sýrustig tímabundið í vatnsgeyminum og við það féll ál (Al) út í formi leirsteinda og/eða zeólíta.

Upplýsing bergs losar ekki einungis um þau efni sem talin eru upp hér að framan heldur einnig um snefilefni og þungmálma sem horfa þarf til varðandi möguleg neikvæð áhrif á vatnsgæði vegna geymslu á CO₂ í jarðlögum. Tilraunir á rannsóknarstofu sýndu aukningu á styrk Sr, Fe, Al, Ca, Ba, Mn, Mg og Cr við inndælingu CO₂ hlaðins vatns í gegnum súlu fyllta af basaltgleri snemma í inndælingarferlinu þegar sýrustig var ennþá lágt. Styrkur efnanna snarlækkaði með hækkandi sýrustigi.³⁰ Niðurstöður rannsókna benda til þess að auðgun á snefilefnum og þungmálum vegna niðurdælingar CO₂ ætti bara að skapa hættu í næsta nærumhverfi niðurdælingar og ætti því ekki að hafa útbreidd áhrif á vatnsgæði í millikerfinu.



Mynd 9.4: Staðsetning holu HN-02 í Þrengslum þar sem tilraunaniðurdæling CO₂ fór fram árið 2012 og þar sem niðurdæling á 4000 tonnum/ári af CO₂ frá Orca verkefninu fer fram í dag. Einnig er sýnd staðsetning vöktunarhola í nágrenninu sem efnasýni eru tekin reglulega úr.

²⁹ Snæbjörnsdóttir o.fl., 2017.

³⁰ Galeczka o.fl., 2013.

Áform Carbfix um niðurdælingu CO₂ á Hellisheiði eru af annarri stærðargráðu en tilraunir og rannsóknir sem gerðar hafa verið og því ekki ljóst hve umfangsmikið nærumhverfi niðurdælingar verður.

Uppbygging á geymslusvæði Carbfix er áætluð í áföngum, sjá kafla 5.1 og 5.6. Því gefst tækifæri til að fylgjast með þróun svæðisins á uppbyggingartíma framkvæmdarinnar, m.a. með því að greina efnastyrk í grunnum og djúpum vöktunarholum, bæði núverandi og nýjum. Vegna óvissu sem er fyrir hendi um rennislísiðir og aðskilnað millikerfis og efri grunnvatnslaga, einkum í Jarðhitagarði, er gert ráð fyrir að vöktunarholur verði staðsettar þannig að þær veiti upplýsingar um dreifingu ferilefna og efnastyrks, sérstaklega í átt til vatnsbólís Hellisheiðarvirkjunar í Engidal. Leiði vöktun og uppfærsla á forðafraeðilíkani fyrir geymslugeymi í millikerfi í ljós að mengun geti borist frá niðurdælingarholum til vatnsbólísins í Engidal getur þurft að endurskoða áform Carbfix um staðsetningu niðurdælingar til að koma í veg fyrir að það spillist. Mismunandi möguleikar á staðsetningu niðurdælingar, sem kynntir eru í umhverfismatinu, gefa svigrúm til slíkra breytinga, auk þess sem öll uppbygging mun fara fram í skrefum og mun því jafnframt gefast svigrúm til að vinna úr gögnum og auka skilning á viðbrögðum svæðisins við niðurdæling CO₂ til geymslu í jarðlögum áður en til umfangsmikillar niðurdælingar kemur.

9.4.3 Vöktun og mótvægisáðgerðir

Gert er ráð fyrir stýringu og vöktun niðurdælingar CO₂ í millikerfi og djúpkerfi geymslusvæðisins á Hellisheiði þegar starfsemi hefst. Fjallað er nánar um stýringar- og vöktunaráætlun í kafla 13.2. Helstu þættir sem verða vaktaðir og mótvægisáðgerðir til að draga úr eða bæta fyrir áhrif á grunnvatn vegna niðurdælingar CO₂ í millikerfi og djúpkerfi á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði eru eftirfarandi:

- Vegna notkunar olíu á tækjum er mjög mikilvægt að öll sem að verkunum koma séu meðvituð um rétt viðbrögð við mengunarslysum, hafi fengið viðeigandi fræðslu og séu með réttan búnað (mengunarvarnarsett o.fl.). Þetta á sérstaklega við um framkvæmdasvæði Carbfix innan Jarðhitagarðs, við Húsmúla og í Sleggjubeinsdal. Minni hætta er á borsvæðum í Þrengslum og við Gráuhnúka sem eru utan aðrennslissvæðis vatnsbólísins í Engidal. Þau eru hins vegar ekki langt frá fjarsvæðum vatnsbóla í Ölfusi og því einnig mikilvægt að vera tilbúin að bregðast rétt við mengunarslysum þar.
- Carbfix leggur áherslu öflugt eftirlit verði með niðurdælingunni svo hægt verði að bregðast við ef vísbendingar eru um niðurstöður séu ekki í takti við það sem líkanareikningar gefa til kynna. Vöktunarholur verða þannig staðsettar að þær veiti upplýsingar um dreifingu ferilefna og efnastyrks. Vatnssýni úr holunum eru greind fyrir styrk heildarefna og snefilefna ásamt því að hitastig, sýrustig og leiðni er mælt. Fylgst verður með styrk ammóníum, TOC og járn í vöktunarholum sem hluta af almennu eftirliti með niðurdælingu CO₂ á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði. Vöktunaráætlun nýinnleiddrar Vatnaáætlunar gerir ráð fyrir vöktun ákveðinna grunnefna.³¹
- Vegna óvissu um rennislísiðir og rennlishraða í jarðlögum á geymslusvæðinu sem og óvissu um hversu mikill aðskilnaður er á milli millikerfis og efri grunnvatnslaga, sérstaklega í Jarðhitagarði ON, verða eftirlitsholur staðsettar þannig í efra grunnvatnskerfi og millikerfi þannig að þær gefi skýra sýn á dreifingu ferilefna og efnastyrks, sérstaklega í átt til Engidals.
- Núverandi og nýjar vöktunarholur, þar á meðal holur sem ON nýtir til þess að fylgjast með áhrifum Hellisheiðarvirkjunar á grunnvatn, munu nýtast Carbfix til þess að fylgjast með

³¹ Umhverfisstofnun, 2022.

mögulegum áhrifum niðurdælingar CO₂ í millikerfi og djúpkerfi á geymslusvæði Carbfix. Núverandi vöktunarholur eru flestar innan við 300 m djúpar og gefa mynd af efnasamsetningu efsta grunnvatnskerfisins, en tvær holur eru dýpri og gefa mynd af efnástandi vatns í millikerfinu. Leiði vöktun í ljós að vöktunarholur séu ekki í nægum tengslum við niðurdælingu á CO₂ til geymslu í jarðlögum verður staðsetning vöktunarhola endurskoðuð.

- Leiði vöktun og uppfærsla á forðafraeðilíkani fyrir geymslugeymi í millikerfi í ljós að mengun geti borist frá niðurdælingarholum til vatnsbólans í Engidal mun Carbfix endurskoða áform um staðsetningu niðurdælingar til að koma í veg fyrir neikvæð áhrif á vatnsból.
- Verði vart við áhrif á grunnvatn önnur en niðurstaða umhverfismats gefur til kynna verða gerðar ráðstafanir til úrbóta sem byggja á viðbragðsáætlun og vöktunaráætlun. Ráðstafanir eru útfærðar í skrefum eftir alvarleika. Í fyrsta skrefi er stuðst við frekari vöktun, sem lýst er í vöktunaráætlun. Í framhaldi eru gerðar breytingar á rekstrarlegum stikum (t.d. þrýstingi eða flæði) á meðan orsök leka er könnuð. Sé orsök óþekkt er niðurdæling stöðvuð tímabundið og niðurdælingarhola skoðuð og hugsanlega gert við hana. Sé viðgerð útilokuð gæti reynst nauðsynlegt að loka holunni og færa niðurdælingu í aðrar holur, eða bora nýja.
- Carbfix mun fylgjast með í vöktunarholu KH-50 hvaða áhrif það hefur á efstu grunnvatnslög að Carbfix dælir niður vatni frá kæliturnum í dýpri lög í stað þess að því sé fargað í grunnar svelgholur.

9.5 Niðurstaða umhverfismats

Framkvæmdatími

Þegar tekið er tillit til grunnástands, viðmiða, mögulegra umhverfisáhrifa og mótvægisáðgerða á framkvæmdatíma niðurdælingar Carbfix á CO₂ á Hellisheiði, eru áhrif á grunnvatn á framkvæmdatíma metin **óveruleg**. Óhapp hefði tímabundin og staðbundin áhrif en með búnaði og viðbragðsaðgerðum er komið í veg fyrir að þau verði alvarleg.

Rekstartími

Fyrirhuguð not Carbfix á vatni frá kæliturnum Hellisheiðarvirkjunar gerir það að verkum að vatn sem annars hefði verið fargað um grunnar svelgholur í nágrenni virkjunarinnar verður dælt dýpra niður í millikerfi CO₂ geymslusvæðis Carbfix í 300-800 m djúpar holur. Má reikna með að sú breyting hafi staðbundið talsvert **jákvæð áhrif** á gæði grunnvatns á virkjunarsvæðinu með því að minnka losun kælivatns í efstu grunnvatnslög.

Niðurdæling á vatni úr lofthreinsiveri Mammoth gæti haft tímabundin og staðbundin **neikvæð áhrif** á styrk járns, ammóníum og TOC í grunnvatni í millikerfinu, en útreikningar gefa til kynna að áhrifin dvíni fljótt.

Möguleiki er á tímabundnum og staðbundnum **neikvæðum áhrifum** á styrk efna eins og kalsíum, magnesíum, járns, snefilegna og þungmálma í næsta nærumhverfi niðurdælingar, en þau áhrif ættu ekki að breiðast út miðað við fyrri reynslu.

Niðurstöður reikninga í forðafraeðilíkani fyrir geymslugeyminn, sem miðast við spá um um dreifingu við niðurdælingu í 30 ár, eru að CO₂ muni ekki berast í efra grunnvatnskerfi eða vatnsból eftir 30 ára niðurdælingu á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði, hvorki frá millikerfi né djúpkerfi.

Þegar tekið er tillit til grunnástands, viðmiða, mögulegra umhverfisáhrifa og mótvægisáðgerða á rekstartíma niðurdælingar Carbfix á CO₂ á Hellisheiði, eru áhrif á grunnvatn og vatnsból á rekstartíma metin **óveruleg**.

10 Jarðskjálftavirkni

10.1 Matsspurningar

Í mati á áhrifum niðurdælingar CO₂ í jörðu á jarðskjálfta á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði er leitast við að svara eftirfarandi matsspurningum.

- Hvaða þættir framkvæmdar á CO₂ geymslusvæði Carbfix eru líklegir til að hafa áhrif á jarðskjálftavirkni?
 - Hefur magn, hitastig og samsetning niðurdælingarvökva áhrif?
 - Getur staðsetning og dýpi niðurdælingarhola haft áhrif?
 - Geta skyndilegar breytingar í niðurdælingu haft áhrif?
 - Verða áhrifin yfir einhverjum viðmiðum?
- Mun mögulega gæta áhrifa jarðskjálftavirkni á iðnaðarsvæðinu á Hellisheiði vegna niðurdælingar á geymslusvæði Carbfix?
 - Horft til nálægðar við aðra starfsemi í nágrenni við geymslusvæðið.
- Mun mögulega gæta áhrifa jarðskjálftavirkni utan iðnaðarsvæðisins á Hellisheiði vegna niðurdælingar á geymslusvæði Carbfix?
 - Horft til nálægðar við íbúðabyggð.

10.2 Rannsóknir, fyrirliggjandi gögn og viðmið

Sérfræðiverkefni um um grunnástand geymslusvæðisins og hugsanlegar breytingar sem framkvæmdinni fylgja var unnið af sérfræðingum Íslenskra orkurannsókna (ÍSOR), í samræmi við samþykktu matsáætlun.³²

Gögn og viðmið sem eru lögð til grundvallar mati á áhrifum á jarðskjálftavirkni eru eftirfarandi:

- Egill Árni Guðnason, Þorbjörg Ágústsdóttir, Sveinborg Hlíf Gunnarsdóttir, Iwona Monika Galeczka, Auður Agla Óladóttir, Ásdís Benediktsdóttir og Gunnlaugur M. Einarsson, 2022. Sérfræðiskýrsla fyrir umhverfismat fyrir niðurdælingu CO₂ á Hellisheiði. Grunnástand og hugsanlegar breytingar. ÍSOR. **(Viðauki 3)**.
- Staðsetningar á jarðskjálftum við Hengilinn, frá Veðurstofu Íslands, frá 1995.
- Jarðskjálftagögn, bæði samfelld og staðsetningar frá ÍSOR, frá 2016.
- Bjarni Bessason o.fl., 2012. Verklag vegna örvaðrar skjálftavirkni í jarðhitakerfum.
- Hildigunnur Thorsteinsson og Gunnar Gunnarsson, 2014. Induced seismicity – Stakeholder Engagement in Iceland.
- Orkustofnun, 2016. Reglur um viðbúnað og viðbrögð við jarðskjálftavá vegna losunar á vökva í jörðu um borholur.
- Carbfix2 Deliverable 3.4 Report on Induced seismicity. Skýrsla Orkuveita Reykjavíkur.
- Vala Hjörleifsdóttir o.fl., 2021. 10 years of induced earthquakes in the Húsmúli CO₂ injection site, Hellisheiði, Iceland. SEG Global Meeting Abstracts: 96-100.
- 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. Skýrsla frá Veðurstofu Íslands.
- Benedikt Halldórsson, Verkfræðistofnun Háskóla Íslands: Hröðunarmælingar.

³² Egill Á. Guðnason o.fl., 2022.

Í skýrslu ÍSOR 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 CO₂ um yfirborð, jarðskjálftavirkni á svæðinu, ásamt niðurdælingar- og borholugögnum (**viðauki 3**). Auk þess er mat lagt á þau hugsanlegu áhrif sem framkvæmd Carbfix kann að hafa á jarðskjálftavirkni á svæðinu, en möguleg náttúruvá á fyrirhuguðu geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði tengist fyrst og fremst jarðskjálftum.

ÍSOR vann frummat á jarðskjálftahættu, með hliðsjón af reglum Orkustofnunar um viðbúnað og viðbrögð við jarðskjálftavá vegna losunar á vökva í jörðu um borholur (nr. OS-2016-R01-01) sem gilda fyrir nýtingaraðila jarðhita. Lagt var mat á það hversu líklegt er að jarðskjálftavirkni fylgi annars vegar viðbót á CO₂ í núverandi niðurdælingu í djúpkerfi í Húsmúla og hins vegar niðurdælingu í nýjar, grynri holur í millikerfi í Jarðhitagarði og iii) niðurdælingu í nýjar, grynri holur í millikerfi á núverandi borsvæðum, þ.e. í Sleggjubeinsdal, Húsmúla, Þrengslum og við Gráuhnúka.

Jarðskjálftavirkni á Hengilssvæðinu, og þar með á mögulegu áhrifasvæði niðurdælingar Carbfix á Hellisheiði, hefur verið samfelt vöktuð frá árinu 1995. Fyrst með SIL-Landsneti jarðskjálftamæla Veðurstofu Íslands (VÍ) frá 1995 og svo frá 2016 með staðbundnu 10 mæla jarðskjálftamælaneti Orku náttúrunnar (ON) og ÍSOR, til viðbótar við SIL-Landsnetið. Á árunum 2018-2021 var svo rekið tímabundið, þétt jarðskjálftamælanet á Hengilssvæðinu sem hluti af Evrópuverkefninu COSEISMIQ, þegar 23 jarðskjálftamælum var bætt við núverandi vöktunarkerfi. Á þeim tíma samanstóð jarðskjálftamælanetið á Hengilssvæðinu því af 37 jarðskjálftamælum.

Hvað varðar jarðskjálftavirkni er áhrifasvæði niðurdælingar á CO₂ til geymslu í jarðlögum á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði neðanjarðar, þ.e. geymslugeymar í millikerfi og djúpkerfi það nær því yfir stærra landfræðilegt svæði undir yfirborði en áhrifasvæði framkvæmdarinnar á yfirborði. Athugunarsvæði tengt frummati á jarðskjálftahættu vegna fyrirhugaðrar framkvæmdar miðast því við áhrifasvæðið neðanjarðar.

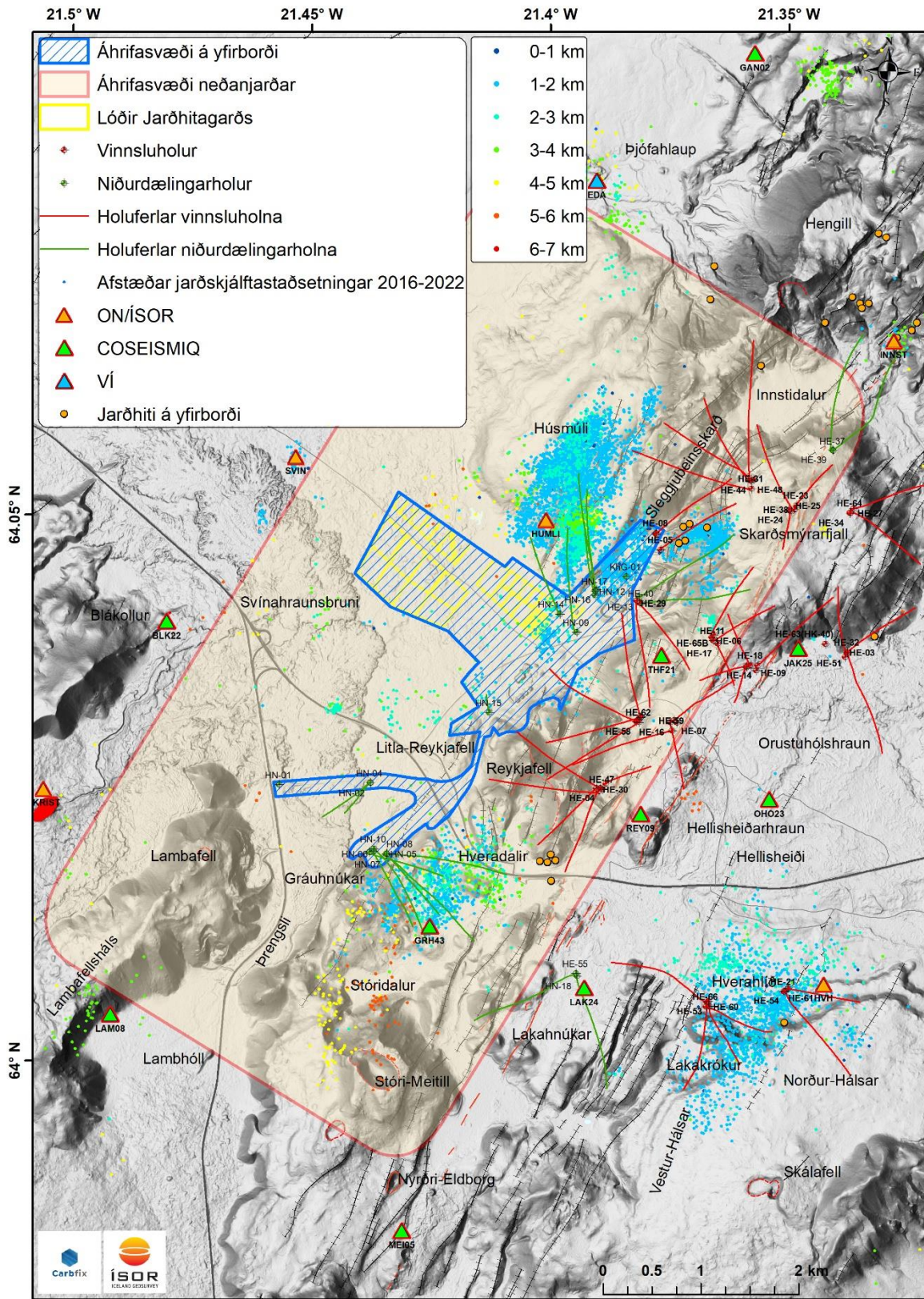
Umfjöllun hér á eftir um grunnástand jarðskjálftavirkni og möguleg áhrif niðurdælingar CO₂ í millikerfi og djúpkerfi geymslugeymis á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði á jarðskjálftavirkni byggir á **viðauka 3**.

10.3 Grunnástand

Fyrirhuguð niðurdæling Carbfix á CO₂ er á Hengilssvæðinu. Hengilssvæðið er náttúrulega virkt jarðskjálftasvæði sökum staðsetningar þess á þrípunkt Reykjanesskagans, Vesturgosbeltisins og Suðurlandsbrotabeltisins. **Yfirlitsmynd 10.1** sýnir áhrifasvæði niðurdælingar á yfirborði og neðanjarðar, ásamt lóðum Jarðhitagarðs ON, vinnsluholum og niðurdælingarholum, jarðhita á yfirborði, auk nákvæmra jarðskjálftastaðsetninga frá 2016 til 2022.

Á virkum jarðhita- og jarðskjálftasvæðum líkt og Hengilssvæðinu er bergspenna mismunandi eftir áttum og spennuorka hleðst upp með tíma, uns bergið brestur í jarðskjálfta. Jarðskjálftavirkni á Hengilssvæðinu öllu er talin vera af þrennum toga:

- Náttúruleg jarðskjálftavirkni.
- Örvuð jarðskjálftavirkni af völdum vinnslu jarðhita.
- Örvuð jarðskjálftavirkni af völdum niðurdælingar vatns.



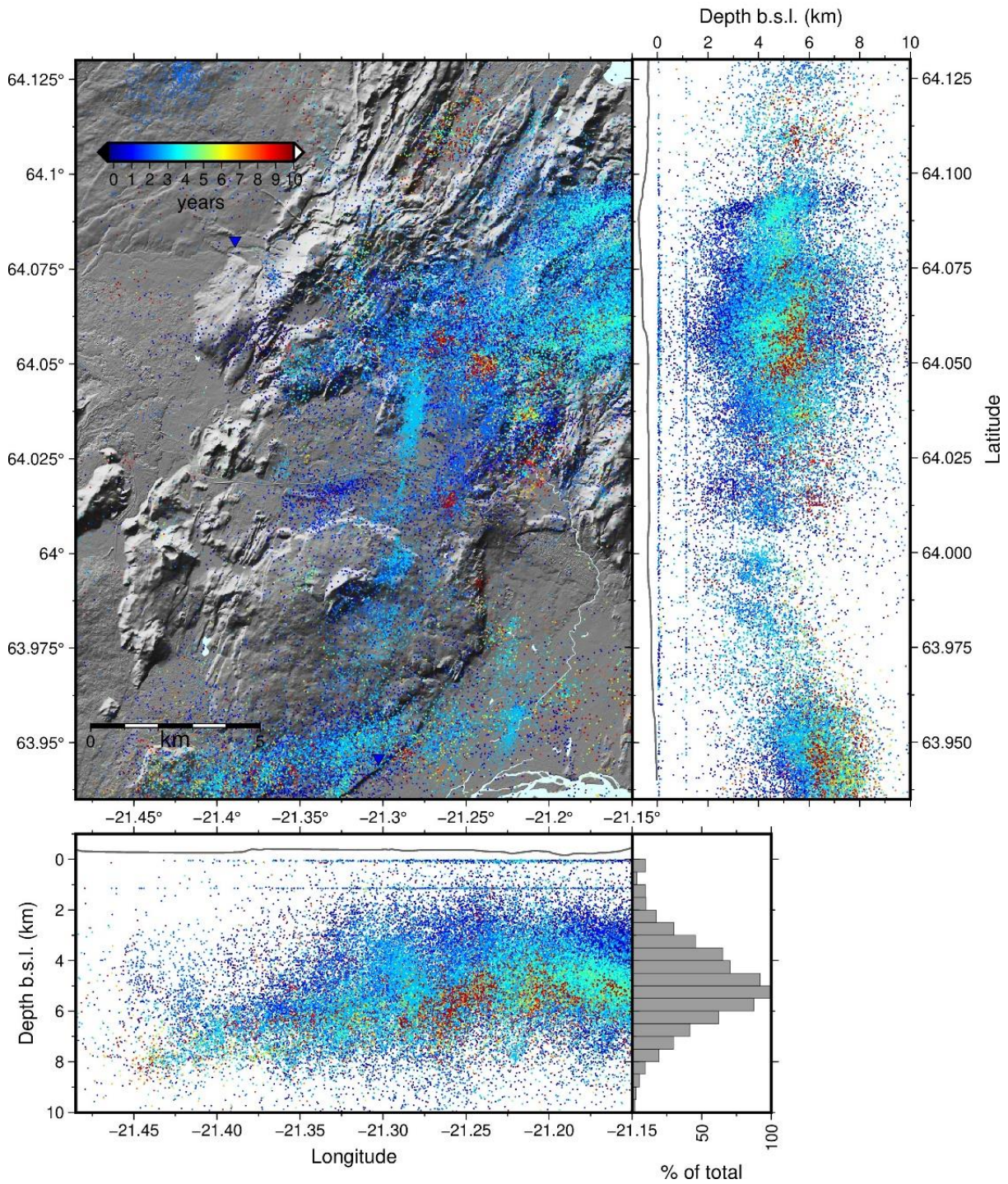
Mynd 10.1: Yfirlitsmynd sem sýnir áhrifasvæði niðurdælingar á yfirborði og mögulegt áhrifasvæði neðanjarðar. Jarðskjálftastaðsetningar á tímabilinu 2016-2022 eru sýndar með punktum og eru litakóðaðar eftir dýpi. Myndin sýnir einnig lóðir Jarðhitagarðs, vinnsluholur (rauðar), niðurdælingarholur (grænar) og jarðhita á yfirborði (appelsínugulir punktar) Þríhyrningar sýna jarðskjálftamælistöðvar ON/ISOR (appelsínugular), COSEISMIQ (grænar) og VÍ (bláar) (Mynd úr viðauka 3).

Náttúruleg jarðskjálftavirkni getur orsakast af tektónískum hreyfingum, spennubreytingum vegna landhæðabreytinga eða ferla í jarðhitakerfunum. Náttúruleg jarðskjálftavirknimælist víðs vegar í þyrpingum á Hengilssvæðinu og er af náttúrulegum orsökum breytileg, bæði í tíma og rúmi. Þá getur truflun á náttúrulegu spennuástandi í bergi, t.d. vegna þrýstilækkunar í jarðhitakerfinu og suðu af völdum vinnslu eða vegna niðurdælingar vatns, 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.

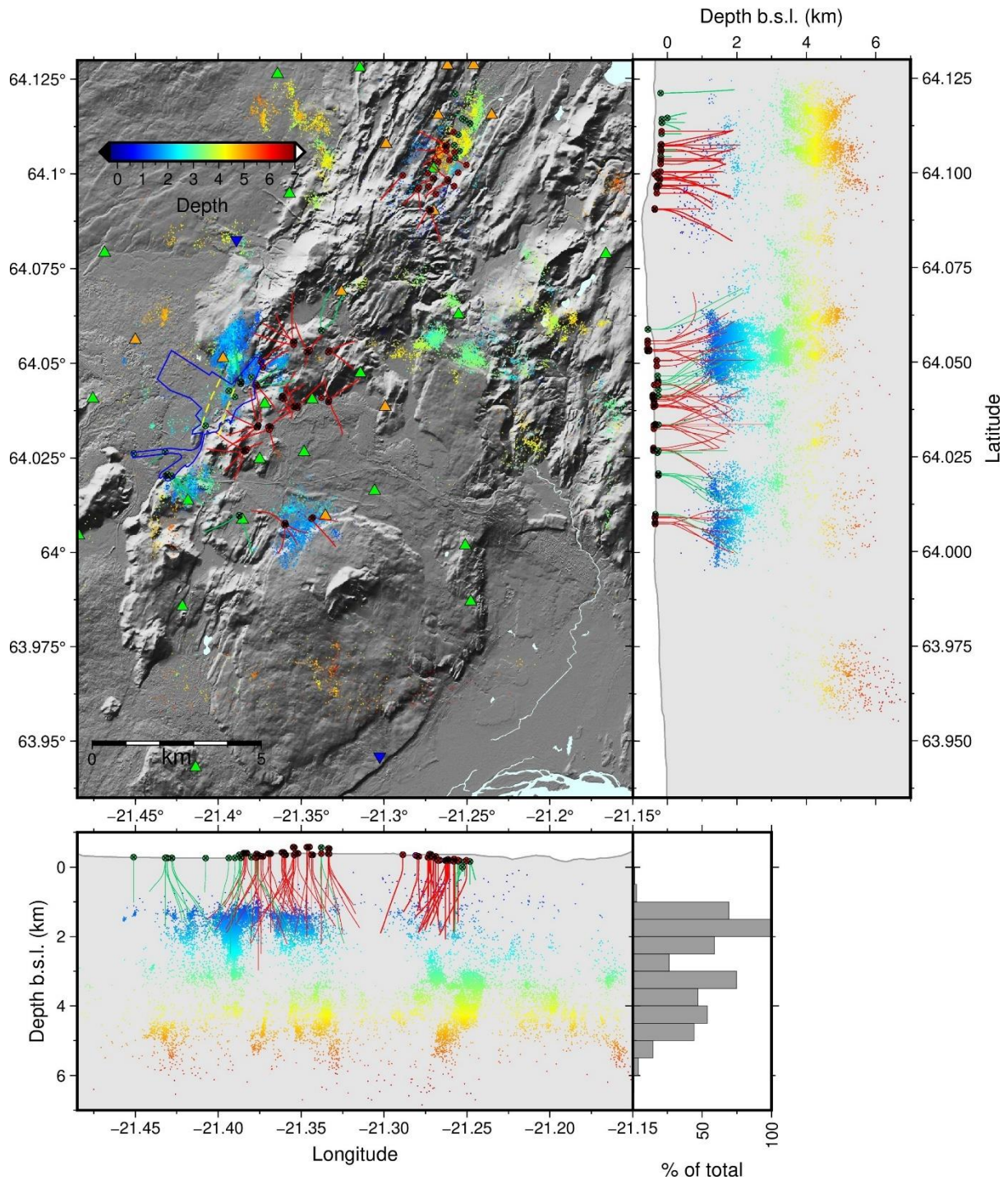
Frá upphafi mælinga er náttúruleg jarðskjálftavirkni á Hengilssvæðinu að mestu bundin við tvær stórar hrinur á árunum 1952-1955 og 1994-1998. Seinni hrinan er betur skráð en sú fyrri, en talið er að hún hafi orsakast af landrisi vegna kvikuinnskots í Grædalseldstöðinni. Jarðskjálftavirkni í hrinunni mældist í þyrpingum víðs vegar um Hengilssvæðið, þó fyrst og fremst á norðausturhluta þess og allt suður á Bakkasvæðið í Ölfusi (**mynd 10.2**, bláir litir). Miðað við fyrirbyggjandi gögn og rannsóknir er ljóst að náttúruleg jarðskjálftavirkni á Hengilssvæðinu á sér stað í þyrpingum og á virkum sprungum víðs vegar um svæðið, frekar en að vera jafndreifð um svæðið. Almennt er talið að mörk deigu og brotgjörnu jarðskorpunnar á Hengilssvæðinu liggja 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, hvort sem það er vegna jarðskorpuhreyfinga eða ferla í jarðhitakerfunum, á sér stað í dýpri hluta brotgjörnu jarðskorpunnar, eða frá um 2 km niður á 7 km dýpi (**mynd 10.3**).

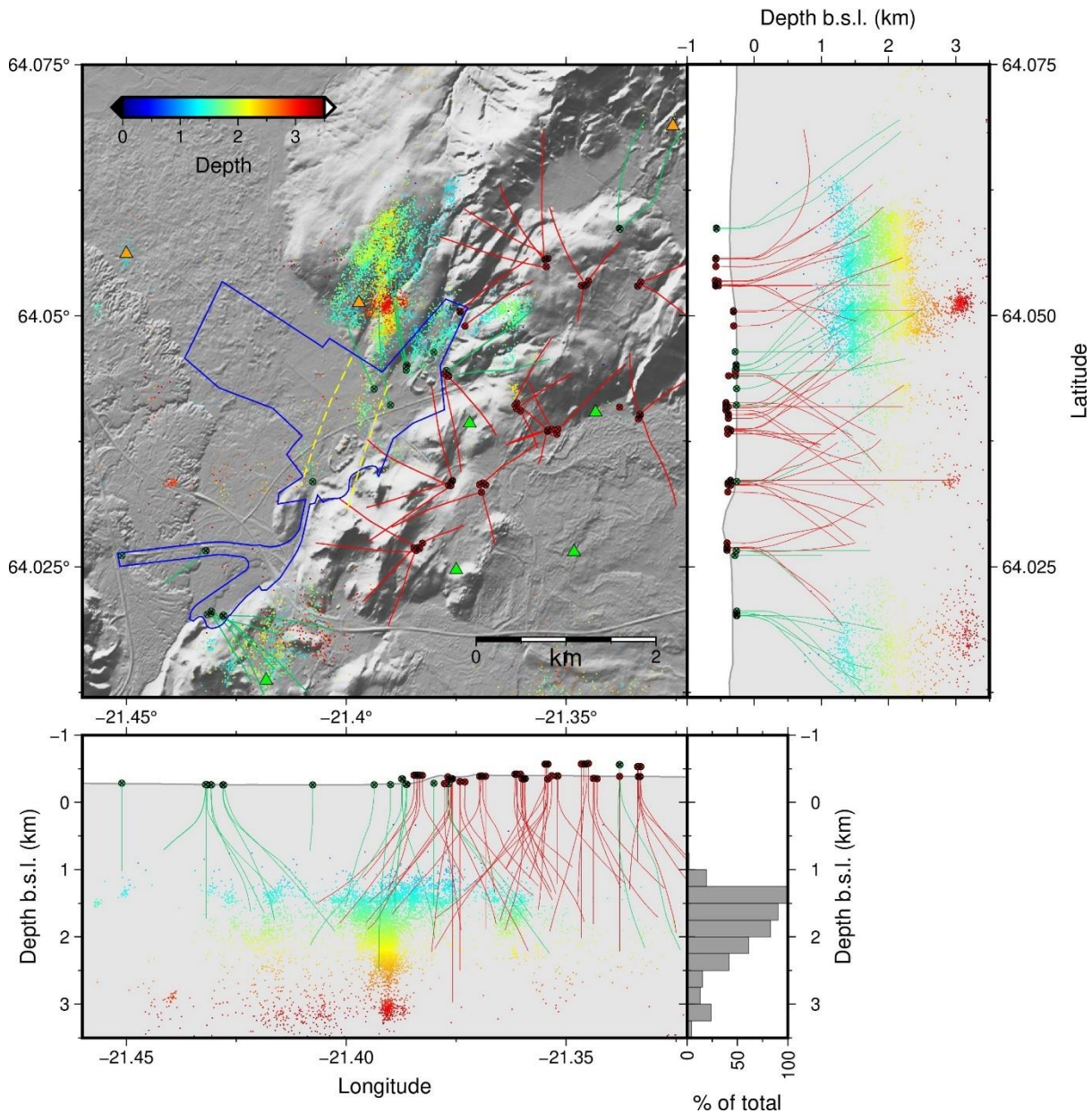
Nýjustu og nákvæmustu jarðskjálftagögnin af Hengilssvæðinu, þ.e. frá 2016-2022, sýna greinilega að jarðskjálftavirknin sem talin er örvuð á helstu vinnslu- og niðurdælingarsvæðunum er töluvert grynri en annars staðar, eða á ~1-3 km dýpi (**myndir 10.3 og 10.4**).



Mynd 10.2: Jarðskjálftastaðsetningar á Hengillsvæðinu úr SIL jarðskjálftamælaneti VÍ fyrir árin 1995-2006, þ.e. áður en vinnsla hófst á Hellisheiði. Jarðskjálftar eru litaðir eftir ári og jarðskjálftamælar VÍ eru táknaðir með bláum þríhyrningi. Upplausn jarðskjálftastaðsetninga á þessu tímabili er takmörkuð vegna fárra og fjarlæggra jarðskjálftamæla, en þó sést að jarðskjálftavirkni er mest á norðaustanverðri Hellisheiði, á Bakkasvæðinu í Ölfusi og á N-S misgengjum á milli þessara svæða, en dýptarákvörðunin er ónákvæm (Mynd úr viðauka 3).



Mynd 10.3: Nákvæmar jarðskjálftastaðsetningar rúmlega 18.000 yfirfarinna jarðskjálfta á Hengilssvæðinu frá 2016 til 2022. Staðsetningar eru reiknaðar með jarðskjálftastöðvum úr jarðskjálftamælanetum ON/ÍSOR (okt. 2016 - sept. 2018, og sept. 2021 - jún. 2022) og COSEISMIQ (okt. 2018 - ágú. 2022), auk nálægra stöðva úr jarðskjálftamælaneti Ví. 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. (Mynd viðauka 3).



Mynd 10.4: Nærmynd af Hellisheiði (sjá skýringar á mynd 10.3). Útmörk áhrifsvæðis á yfirborði eru skilgreind með blárrí línu og jarðskjálftar eru litaðir eftir dýpi. Gular punktalínur sýna áætlaða legu misgengja sem kortlögð voru með þyngdarmælingum. (Mynd úr viðauka 3)

Jarðhitavinnsla fyrir Hellisheiðarvirkjun

Áhrif jarðhitavinnslu fyrir Hellisheiðarvirkjun á jarðskjálftavirkni á Hellisheiði er mjög mismunandi eftir svæðum (**mynd 10.3**), 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, og hófst jarðskjálftavirkni í Hverahlíð samhliða vinnslunni

og virðist því örðuð af henni. Talið er að jarðskjálftarnir einskorðist við gufupúðann, 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.

Niðurdæling affallsvatns frá Hellisheiðarvirkjun

Áhrif niðurdælingar affallsvatns frá Hellisheiðarvirkjun á jarðskjálftavirkni á Hellisheiði er að sama skapi mjög mismunandi eftir svæðum (**myndir 10.3 og 10.4**). Núverandi niðurdælingarsvæði eru í Gráuhnúkum, Húsmúla, Sleggjubeinsdal, á Skarðsmýrarfjalli og í Hverahlíð, auk þess sem dælt hefur verið í niðurdælingarholur 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 viðkvæmara fyrir niðurdælingu vatns. Dæmi þess til sönnunar eru frá Húsmúla og upp að vissu marki Sleggjubeinsdal. Í Húsmúla fylgdi allmikil örðuð jarðskjálftavirkni upphafi niðurdælingar í september 2011 og náði hún hámarki um mánuði síðar þegar tveir stærstu jarðskjálftarnir, um 4 M_L að stærð, áttu sér stað. Eftir að þessu hámarki var náð, var dregið úr heildarmagni niðurdælingar og minnkaði jarðskjálftavirkni að sama skapi. Vísbendingar eru um að niðurdæling í Húsmúla sé búin að losa um mestu mismunaspennuna, og að nokkurs konar vökva- og þrýstijafnvægi sé að komast á. Árið 2014 var CO₂ í fyrsta skipti leyst upp í niðurdælingarvatni í Húsmúla, en sú breyting á efnasamsetningu vökvans olli ekki aukningu í jarðskjálftavirkni (sjá nánar í **viðauka 3**).

10.4 Umhverfisáhrif

Fjöldmörg dæmi eru um að niðurdæling vatns geti örvað jarðskjálftavirkni, bæði hérlendis og erlendis. Líkt og nefnt var í kafla 10.3 hér að framan hleðst spennuorka í bergi upp með tíma og því getur truflun á þessu spennuástandi með niðurdælingu vatns flýtt fyrir jarðskjálfta sem í vændum var. 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 árið 2011, 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.

Frá því að niðurdæling á affallsvatni frá Þeistareykjavirkjun í grunnar holur hófst árið 2018 sýna gögn frá gervitunglamælingum (InSAR) að land hefur sigið mjög staðbundið, um 10–15 mm/ári, á litlu svæði umhverfis niðurdælingarholurnar (**viðauki 3**). Það sýnir að grunn niðurdæling getur orsakað staðbundna aflögun. Í samræmi við ábendingar ÍSOR mun Carbfix fylgjast með landhæðarbreytingum og aflögun á áhrifasvæði niðurdælingar CO₂ á Hellisheiði með gervitunglamælingum (InSAR)-.

Fyrirhuguð framkvæmd felur í sér niðurdælingu á CO₂ hlöðnu vatni niður í geymslugeymi millikerfis annars vegar, og í djúpkerfi hins vegar, á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði. Niðurdæling vökva í jörðu getur leitt til örvaðrar jarðskjálftavirkni þegar vatnið streymir frá niðurdælingarholum út í jarðlög. Niðurdæling í djúpkerfi á geymslusvæðinu verður eingöngu niðurdæling á CO₂ og H₂S frá núverandi og nýrri hreinsistöð ON við Hellisheiðarvirkjun og felur ekki í sér niðurdælingu á auknum massa vatns. Breytingin felur aðeins í sér að meira gas (CO₂ og H₂S) er leyst í affallsvatni frá virkjuninni sem þegar er dælt niður í sömu holur við Húsmúla og notaðar eru í dag, holur HN-16 og HN-14. Auk þess kemur til greina að útbúa fyrirbyggjandi holur ON, sem eru á sömu borteigum, fyrir niðurdælingu CO₂ og H₂S í djúpkerfi. Í öllum öðrum niðurdælingarverkefnum Carbfix á

Hellisheiði er gert ráð fyrir að CO₂ verði dælt niður í millikerfið, þ.e. ofan jarðhitakerfisins og neðan efri grunnvatnslaga.

Í lok apríl árið 2014 varð sú breyting á niðurdælingu affallsvatns frá Hellisheiðarvirkjun í djúpkerfið í Húsmúla að CO₂ 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 örðuð jarðskjálftavirkni hafi mögulega minnkað í kjölfarið, ef eitthvað er.³³

Unnið var frummat á jarðskjálftahættu með hliðsjón af reglum Orkustofnunar um viðbúnað og viðbrögð við jarðskjálftavá vegna losunar á vökva í jörðu um borholur (OS-2016-R01-01), sjá **viðauka 3**. Lagt var mat á hversu líklegt er að jarðskjálftavirkni fylgi eftirfarandi útfærslum niðurdælingarverkefna Carbfix:

- Viðbót á CO₂ og H₂S í núverandi niðurdælingu í djúpkerfi í Húsmúla.
- Niðurdæling í nýjar holur í millikerfi í Jarðhitagarði.
- Niðurdæling í nýjar holur í millikerfi á borsvæðum í Sleggjubeinsdal, Húsmúla, Þrengslum og við Gráuhnúka.

10.4.1 Niðurstöður frum mats á jarðskjálftahættu vegna framkvæmdaáforma Carbfix á Hellisheiði.

Niðurdæling í djúpkerfi á Húsmúlasvæði

Í ljósi fyrirliggjandi gagna er niðurstaða frum mats ÍSOR fyrir aukið magn af uppleystu CO₂ í núverandi niðurdælingu í djúpkerfi 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 jafn mikil 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_L) sömuleiðis minni. ON hefur rekið þétt skjálftamælanet á Hengilssvæðinu síðan 2016, sem gerir kleift að fylgjast náið með mögulegum breytingum í jarðskjálftavirkni vegna niðurdælingar affallsvatns. ON dælir affallsvatni frá Hellisheiðarvirkjun niður samhliða og í sömu holur og Carbfix mun dæla CO₂ og H₂S í djúpkerfi. Carbfix mun hafa virkt eftirlit með mögulegri jarðskjálftavirkni í samstarfi við ON vegna niðurdælingar í djúpkerfi auk þess sem ON fylgir verklagi við niðurdælingu til að lágmarka hættu á örvaðri skjálftavirkni. Allt vatn sem er dælt niður og CO₂ og H₂S verður leyst í fellur undir niðurdælingarverkefni ON í Húsmúla. Það er talið mun líklegra til að leiða til örvaðrar jarðskjálftavirkni en niðurdæling Carbfix sem leggur eingöngu til gasið, nánar er fjallað um stýringu og vöktun í kafla 13.2.

Niðurdæling í millikerfi í Jarðhitagarði

Í ljósi fyrirliggjandi gagna er niðurstaða frum mats ÍSOR fyrir niðurdælingu í nýjar, grynri holur í millikerfi í Jarðhitagarði, 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 á milli millikerfisins og jarðhitakerfisins, þar sem bergspenna er hærrí og jarðskorpan er nógu sterk til að brotna í jarðskjálfta. Dæmi þessu til staðfestingar eru um grunna niðurdælingu í Þrengslum, á Nesjavöllum og á Þeistareykjum, ásamt nýlegum dæmum um framrás kvikuganga á Íslandi, sem sýna að jarðskorpan í efstu ~2 km innan gosbeltanna á Íslandi sé almennt of veik til þess að brotna í jarðskjálftum.

³³ Hjörleifsdóttir o.fl., 2021.

Yfirborðsprungur eru ekki sjáanlegar í nýlegum hraunum innan Jarðhitagarðs ON, en misgengi hafa verið rakin með þyngdarmælingum úr Húsmúla annars vegar og vesturhlíðum Sleggjubeinsdal hins vegar til suðurs í átt að Litla-Reykjafelli og Reykjafelli. Því er ekki hægt að útiloka önnur grafin misgengi innan Jarðhitagarðsins. Jarðskjálftavirkni sem mælst hefur á 1-3 km dýpi innan Jarðhitagarðs frá 2016-2022 fellur innan svæðis sem þessi tvö misgengi afmarka. Í samræmi við ráðleggingar ÍSOR verður niðurdæling í millikerfi aukin í litlum skrefum, þ.e. streymið aukið smátt og smátt á nokkrum klukkustundum eða dögum og fylgst vel með jarðskjálftavirkni á áhrifasvæði niðurdælingar neðanjarðar við eftirfarandi aðstæður:

- Þegar boranir hefjast.
- Þegar niðurdæling hefst.
- Þegar magn niðurdælingar er aukið.

Niðurdæling í millikerfi í Sleggjubeinsdal, Húsmúla, Þrengslum og við Gráuhnúka

Í ljósi fyrirliggjandi gagna er niðurstaða frummats ÍSOR fyrir niðurdælingu í nýjar, grynri holur í millikerfi á borsvæðum í Sleggjubeinsdal, Húsmúla, Þrengslum og við Gráuhnúka **að hætta á finnanlegri jarðskjálftavirkni sé óveruleg**. Rökstuðningur er sá sami og á við um frummat fyrir niðurdælingu í nýjar, grynri holur í millikerfi í Jarðhitagarði ON. Niðurdæling í millikerfi á framangreindum borsvæðum verður aukin í litlum skrefum og fylgst vel með jarðskjálftavirkni á áhrifasvæði niðurdælingar með sama hætti og í Jarðhitagarði.

Komi til finnanlegrar jarðskjálftavirkni vegna niðurdælingar CO₂ og H₂S í djúpkerfi í Húsmúla eða niðurdælingar í millikerfi á borsvæðum í Jarðhitagarði, Sleggjubeinsdal, Húsmúla, Þrengslum og við Gráuhnúka er talið að áhrifasvæði neðanjarðar muni stefna u.þ.b. N-S til NNA-SSV. Það muni afmarkast gróflega af Húsmúla í norðri, Skarðsmýrarfjalli og Lakahnúkum í austri, Stóra-Meitli og Lambafelli í suðri og Svínahrauni í vestri (**mynd 10.1**). Þetta mat er byggt á fyrirliggjandi gögnum um örvaða jarðskjálftavirkni og hvernig hún hefur teygt sig í tíma og rúmi. Líklegt er að raunverulegt áhrifasvæði niðurdælingar CO₂ á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði komi til með að verða minna að flatarmáli.

10.4.2 Vöktun og mótvægisáðgerðir

Gert er ráð fyrir stýringu og vöktun niðurdælingar CO₂ í millikerfi og djúpkerfi geymslusvæðisins á Hellisheiði þegar starfsemi hefst. Fjallað er nánar um stýringar- og vöktunaráætlun í kafla 13.2. Helstu þættir sem verða vaktaðir og mótvægisáðgerðir til að draga úr eða bæta fyrir áhrif örvaðrar jarðskjálftavirkni vegna niðurdælingar CO₂ í millikerfi og djúpkerfi á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði eru eftirfarandi:

- Hætta á örvaðri skjálftavirkni vegna niðurdælingar CO₂ á Hellisheiði er lágmörkuð með því að stýra rennslishraða í niðurdælingarholur. Vöktun á skjálftavirkni byggir á svokölluðu umferðarljósakerfi sem hefur verið í notkun frá 2012 fyrir niðurdælingu á skiljuvatni frá Hellisheiðarvirkjun. sjá nánari umfjöllun í kafla 13.2.
- ON vinnur samkvæmt verklagi um niðurdælingu og reglum Orkustofnunar nr. OS-2016-R01-01, um viðbúnað og viðbrögð við jarðskjálftavá vegna losunar vökva í djúpkerfi. Carbfix mun vinna eftir sama verklagi við niðurdælingu í djúpkerfi. Það miðar að því að gera ekki skyndilegar breytingar á niðurdælingu og þannig minnka hættu á örvaðri jarðskjálftavirkni. Þegar hefja á niðurdælingu á ný, eða gera verulegar breytingar á niðurdælingu, eru sendar út tilkynningar til hagsmunaaðila til að vara við mögulegri aukningu í jarðskjálftavirkni.
- Í samræmi við ráðleggingar ÍSOR mun Carbfix auka niðurdælingu CO₂ í millikerfi í Jarðhitagarði og öðrum fyrirhuguðum borsvæðum á geymslusvæðinu á Hellisheiði í litlum

skrefum, þ.e. auka streymið smátt og smátt á nokkrum klukkustundum eða dögum, og fylgjast vel með jarðskjálftavirkni á áhrifasvæði niðurdælingar neðanjarðar þegar boranir hefjast, þegar niðurdæling hefst og þegar magn niðurdælingar er aukið..

- Gert er ráð fyrir áframhaldandi vöktun jarðskjálfta á Hellisheiðarsvæðinu í samstarfi við Orku náttúrunnar með núverandi jarðskjálftamælanetum ON/ÍSOR og VÍ. 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) (**mynd 10.1**). Í samræmi við ráðleggingar ÍSOR er gert ráð fyrir að bæta við einum jarðskjálftamæli á vestanverðu svæðinu, þ.e. vestur af Jarðhitagarði. Með því móti verður hægt að greina með vissu hvort örвуð jarðskjálftavirkni tengist niðurdælingarverkefnum Carbfix.
- Í samræmi við ábendingar ÍSOR gerir Carbfix ráð fyrir að fylgjast með mögulegum staðbundnum landhæðarbreytingum og aflögun á áhrifasvæði niðurdælingar CO₂ í millikerfi á Hellisheiði með -gervitunglamælingum (InSAR).

10.5 Niðurstaða umhverfismats

Á framkvæmdatíma er búist við óverulegum áhrifum á jarðskjálftavirkni af völdum framkvæmdar á geymslusvæði Carbfix.

Samkvæmt mati á jarðskjálftahættu er talið að hætta sé á finnanlegri jarðskjálftavirkni á rekstartíma vegna niðurdælingar CO₂ í djúpkerfi í Húsmúla og eru áhrif án mótvægisáðgerða metin talsvert neikvæð. Að teknu tilliti til framangreindra mótvægisáðgerða eru áhrif á jarðskjálftavirkni vegna niðurdælingar CO₂ í djúpkerfi metin **óveruleg**.

Hætta á finnanlegri jarðskjálftavirkni á rekstartíma vegna niðurdælingar í millikerfi, hvort heldur er í Jarðhitagarði eða á öðrum borsvæðum á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði, er talin óveruleg samkvæmt mati á jarðskjálftahættu. Áhrif niðurdælingar CO₂ í millikerfi á jarðskjálftavirkni eru því metin **óveruleg**.

Niðurstaða umhverfismats niðurdælingar CO₂ til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði, hvort heldur er í djúpkerfi eða millikerfi geymslusvæðis Carbfix, er að framkvæmdin hafi **óveruleg áhrif** á jarðskjálftavirkni.

11 Loftslag

11.1 Matsspurningar

Í mati á áhrifum niðurdælingar CO₂ til geymslu í jörðu á loftslag er leitast við að svara eftirfarandi matsspurningum.

- Hvaða þættir uppbyggingar og reksturs geymslusvæðis Carbfix eru líklegir til að hafa áhrif á loftslag?
 - Með hvaða hætti mun framkvæmdin mögulega auka eða draga úr losun gróðurhúsalofttegunda?
- Hefur framkvæmdin mögulega áhrif á markmið stjórnvalda, Orkuveitusamstæðunnar og Carbfix um losun gróðurhúsalofttegunda?
 - Hvernig samræmist niðurdæling CO₂ markmiðum og aðgerðaáætlun stjórnvalda í loftslagsmálum?

11.2 Rannsóknir, fyrirliggjandi gögn og viðmið

Áætlanir hafa verið gerðar um hvernig byggja megi upp starfsemi tengda niðurdælingu CO₂ til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði og hvernig slík uppbygging getur haft áhrif á loftslag.

Gögn og viðmið sem eru lögð til grundvallar mati á áhrifum á loftslag eru eftirfarandi:

- Skýrsla Milliríkjanefndar Sameinuðu Þjóðanna um loftslagsbreytingar (IPCC).
- Rammasamningur Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar.
- Markmið Íslands og skuldbindingar í loftslagsmálum.
- Aðgerðaáætlun í loftslagsmálum. Aðgerðir íslenskra stjórnvalda til að stuðla að samdrætti í losun gróðurhúsalofttegunda til 2030 (Umhverfis- og auðlindaráðuneytið, 2020).
- Umhverfis- og auðlindastefna Carbfix.
- Umhverfis- og auðlindastefna ON (STE-230-20.0).
- Loftslagsmarkmið OR samstæðu og staða þeirra 2015-2030.
- Ársskýrsla OR 2021.
- Bergur Sigfússon o.fl. 2018. Reducing emissions of carbon dioxide and hydrogen sulphide at Hellisheidi power plant in 2014-2017 and the role of CarbFix in achieving the 2040 Iceland climate goals.

Ísland er aðili að rammasamningi Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar og jafnframt aðili að Kýmótó-bókuninni og Parísarsamkomulaginu.³⁴ Markmið Parísarsamkomulagsins er að koma í veg fyrir að hitastig jarðar hækki um meira en 2°C og helst ekki meira en um 1,5°C, miðað við meðal hitastig jarðar fyrir iðnvæðingu. Þá tekur Ísland þátt í sameiginlegu markmiði Evrópuríkja um 40% samdrátt í losun gróðurhúsalofttegunda á tímabilinu 2021-2030 miðað við árið 1990 og stefnir að kolefnishlutleysi árið 2040.³⁵ Í samræmi við kröfur á aðildarríki um að uppfæra framlög sín gagnvart samningnum á fimm ára fresti tilkynntu íslensk stjórnvöld markmið um aukinn samdrátt í losun gróðurhúsalofttegunda í desember 2020 miðað við árið 1990 úr 40% í 55% samdrátt eða meira til ársins 2030, í samfloti með ESB og Noregi.³⁶ Ný ríkisstjórn setti svo fram í stjórnarsáttmála frá

³⁴ <https://www.loftslagsrad.is/frodleikur/althjodamal/>

³⁵ Umhverfis- og auðlindaráðuneytið, 2020.

³⁶ Umhverfis- orku og loftslagsráðuneytið, 2022.

nóvember 2021 markmið um 55% samdrátt í losun gróðurhúsalofttegunda á beinni ábyrgð Íslands árið 2030.³⁷

Samkvæmt aðgerðaáætlun Íslands í loftslagsmálum felst mesti ávinningurinn í föngun CO₂ frá jarðvarmavirkjunum, af þeim fjórum aðgerðum sem eru settar fram varðandi orkuframleiðslu og smærri iðnað. Meðal tilgreindra leiða til að ná markmiðum um samdrátt í losun er þróun Carbfix aðferðarinnar við niðurdælingu CO₂ til geymslu með bindingu í jarðlögum. Samkvæmt aðgerðaáætluninni er áætlað að losun vegna orkuvinnslu frá jarðvarma muni árið 2030 hafa dregist saman um að minnsta kosti 47% árið 2030 miðað við 2005 eða sem nemur um 108 þúsund tonnum af CO₂-ígildum.

Opinber stefna Orkuveitu Reykjavíkur³⁸ og Orku náttúrunnar³⁹ er að fyrirtækin verði kolefnishlutlaus árið 2030. Öll fyrirtæki Orkuveitusamstæðunnar og Carbfix vinna gegn og bregðast við áhrifum loftslagsbreytinga með eigin starfsemi og hafa þannig bein áhrif á kolefnisspor íbúa og atvinnulífs.

11.3 Grunnástand

Líkt og fram kemur í nýjustu skýrslu Milliríkjanefndar Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (IPCC)⁴⁰ er tengingin á milli athafna mannkyns og margvíslegra breytinga á loftslagi greinilegri en aldrei fyrr. Ljóst er að hlýnun jarðar vex með aukinni losun gróðurhúsalofttegunda en einnig má búast við breytingum á veðrakerfum sem gætu haft gríðarleg áhrif um allan heim.

Í skýrslunni er fjallað um að bæði sé óhjákvæmilegt að koma í veg fyrir losun, m.a. með því að 1) fanga CO₂ úr útblæstri og koma þannig í veg fyrir áhrif þess á loftslagið og jafnframt ná kolefnishlutleysi og 2) fanga CO₂ sem þegar hefur verið losað út í lofthjúpin. Kolefnisföngun og -förgun eru hluti af þeim aðgerðum sem skilgreindar eru í skýrslunni og er í langflestum sviðsmmyndum gert er ráð fyrir kolefnishlutleysi, þvert á geira.

Í aðgerðaáætlun íslenskra stjórnvalda er gert ráð fyrir að nýta föngun og förgun CO₂ sem aðgerð til þess að draga úr losun CO₂ frá jarðvarmavirkjunum og stóriðjufyrirtækjum á Íslandi. Talið er að sú aðgerð gefi hvað mestan ávinning af þeim aðgerðum sem tilgreindar eru fyrir orkuframleiðslu og smærri iðnað.

Árið 2014 var núverandi hreinsistöð ON við Hellisheiðarvirkjun gangsett og frá 2016 hefur hún hreinsað um 12.000 tonn/ári af CO₂ úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar og dælt í borholur í Húsmúla niður í djúpkerfi fyrirhugaðs geymslusvæðis Carbfix. Um er að ræða um 30% af því CO₂ úr jarðhitageyminum sem fer í gegnum vinnsluferli virkjunarinnar á ári hverju. Það CO₂ sem ekki er hreinsað, um 33.000 tonn/ári, er losað út í andrúmsloftið. Núverandi lofthreinsiver Orca í Jarðhitagarðinum á Hellisheiði getur fangað allt að 4.000 tonn/ári af CO₂ beint úr andrúmslofti og því er nú dælt niður í millikerfi geymslusvæðisins í Þrengslum.

11.4 Umhverfisáhrif

Carbfix aðferðafræðin var þróuð með það að markmiði að líkja eftir og hraða náttúrulegum ferlum þar sem CO₂ leyst í vatni umbreytist í steindir og verður þannig varanlega bundið djúpt í jarðlögum, sjá nánari umfjöllun um aðferðafræðina í köflum 1.3 og 3.3. Í raun var aðferðafræðin upphaflega

³⁷ Stjórnarráð Íslands, 2021.

³⁸ <https://www.or.is/um-or/skipulag-og-stjornhaettir/stefnuskjol/umhverfis-og-audlindastefna/>

³⁹ <https://www.on.is/wp-content/uploads/2021/10/umhverfis-og-audlindastefna-on.pdf>

⁴⁰ IPCC, 2022.

þróuð með það að markmiði að þróa náttúrulega lausn til að farga CO₂ frá Hellisheiðarvirkjun og minnka þannig losun CO₂ í andrúmsloft.

Markmið framkvæmdar Carbfix er að auka umfang og tryggja framtíð niðurdælingar CO₂ til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði. Skipta má verkefninu í þrennt:

- Niðurdæling á CO₂ og H₂S úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar í djúpkerfi
- Niðurdæling á CO₂ úr andrúmslofti frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði í millikerfi
- Niðurdæling á CO₂ úr andrúmslofti frá nýjum aðilum í millikerfi; frá nýrri starfsemi á athafnasvæði ON eða flutt á staðinn til niðurdælingar

Niðurdæling CO₂ úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar með niðurdælingu í djúpkerfi

Með niðurdælingu CO₂ í djúpkerfi geymslusvæðis Carbfix verður stuðlað að föngun nær alls CO₂ úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar og geymslu þess í jörðu. Þannig verður komið í veg fyrir áhrif losunar CO₂ frá virkjuninni í andrúmsloft á loftslag. Með tilkomu nýrrar hreinsistöðvar sem ON mun reisa við Hellisheiðarvirkjun verður nánast allt CO₂ (allt að 95%) hreinsað og dælt niður á vegum Carbfix í djúpkerfi á geymslusvæði Carbfix og losun út í andrúmsloft frá starfsemi virkjunarinnar verður því aðeins brot af því sem hún er í dag. Hreinsistöðin mun jafnframt minnka losun CO₂ um sem nemur 10% af þeim samdrætti sem gert er ráð fyrir í aðgerðaráætlun Íslands í loftslagsmálum fyrir 2030 í flokki orkuframleiðslu og smærri iðnaðar. Reynsla af föngun CO₂ frá Hellisheiðarvirkjun og geymslu þess í jarðlögum mun gagnast til að minnka losun frá öðrum jarðhitavirkjunum, bæði hér á landi og erlendis. Framkvæmd Carbfix er forsenda þess að Hellisheiðarvirkjun geti verið sporlaus árið 2025 með niðurdælingu á allt að 47.000 tonn/ári af CO₂ út útblæstri virkjunarinnar (kafla 3.1). Með verkefninu verður því komið í veg fyrir losun gróðurhúsalofttegundarinnar CO₂ frá Hellisheiðarvirkjun út í andrúmsloftið. Það hefur jákvæð áhrif á loftslag.

Líkt og sett er fram í umfjöllun um viðmið telja íslensk stjórnvöld föngun og geymslu CO₂ frá jarðvarmavirkjunum eina mikilvægustu aðgerðina til þess að ná skilgreindum loftslagsmarkmiðum Íslands. Samdráttur í losun frá Hellisheiðarvirkjun með niðurdælingu í djúpkerfi er því í samræmi við stefnu stjórnvalda.

Niðurdæling á CO₂ úr andrúmslofti frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði í millikerfi

CO₂ sem fangað verður úr andrúmslofti í Jarðhitagarði í núverandi og nýju lofthreinsiveri Climeworks, ásamt þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni, verður dælt niður í millikerfi geymslusvæðis Carbfix til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði. Með nýja Mammoth lofthreinsiveri Climeworks, sem nú er í byggingu, verða allt að 40.000 tonn af CO₂ fönguð úr andrúmslofti árlega og dælt niður í jörðu í millikerfi á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði til geymslu í jarðlögum. Framkvæmdin er einnig forsenda þess að Carbfix geti tekið við allt að 40.000 tonnum/ári af CO₂ frá nýju lofthreinsiveri Climeworks og allt að 4.000 tonnum/ári af CO₂ frá lofthreinsiveri Orca til niðurdælingar, ásamt allt að 15.000 tonnum/ári frá þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni. Samtals verða því allt að 59.000 tonn/ári af CO₂ fjarlægð úr andrúmslofti og dælt niður til geymslu í jarðlögum í þessum hluta framkvæmdarinnar. Niðurdæling á CO₂ kemur þannig í veg fyrir að það hafi gróðurhúsaáhrif. Það hefur jákvæð áhrif á loftslag.

Niðurdæling á CO₂ úr andrúmslofti frá nýjum aðilum í millikerfi; frá nýrri starfsemi á athafnasvæði ON eða flutt á staðinn til niðurdælingar

Gert er ráð fyrir að CO₂ fönguðu úr andrúmslofti, frá nýrri starfsemi, eða aðflutt CO₂ frá nýjum aðilum verði í framtíðinni dælt niður í millikerfi geymslusvæðis Carbfix.

Áætlað er að allt að 300.000 tonn/ári af CO₂ frá nýjum aðilum verði dælt niður til geymslu í jörðu á svæðinu til lengri tíma litið. Með því er CO₂ ýmist fjarlægt úr andrúmslofti eða komið í veg fyrir þetta CO₂ berist í andrúmsloft og hafi gróðurhúsaáhrif. Það hefur jákvæð áhrif á loftslag.

11.4.1 Mótvægisáðgerðir

Niðurdæling CO₂ í djúpkerfi og millikerfi geymslusvæðis Carbfix á Hellisheiði hefur jákvæð áhrif á loftslag og er í samræmi við opinbera stefnu stjórnvalda og markmið verkefnisins. Því er ekki þörf á mótvægisáðgerðum vegna áhrifa á loftslag.

11.5 Niðurstaða umhverfismats

Ef allt er tekið saman er niðurdæling CO₂ frá útblæstri Hellisheiðarvirkjunar í djúpkerfi, niðurdæling CO₂ úr andrúmslofti frá lofthreinsiverum í Jarðhitagarði og niðurdæling frá nýjum aðilum, þá eru það allt að 406.000 tonn/ári af CO₂ sem Carbfix mun dæla niður til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði. Niðurdæling CO₂ á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði mun draga úr losun gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloft á landsvísu auk þess sem CO₂ sem þegar hefur verið losað út í andrúmsloft verður hreinsað í lofthreinsiverum. Verkefnið mun því hafa jákvæð áhrif á loftslag.

Þannig styður verkefnið við loftslagsmarkmið íslenskra stjórnvalda, en ekki síður við alþjóðleg markmið og alþjóðasamninga. Þegar tekið er tillit til grunnástands, viðmiða og mögulegra umhverfisáhrifa vegna niðurdælingar Carbfix á CO₂ á Hellisheiði á loftslag, eru áhrifin metin **verulega jákvæð**.

12 Skipulag og landnotkun

12.1 Skipulagsmál

12.1.1 Landsskipulag

Landsskipulagsstefna 2015-2026 var samþykkt á Alþingi 16. mars 2016. Með henni liggur fyrir samræmd stefna um skipulagsmál á landsvísu. Stefna landsskipulags tekur ekki til þátta er snerta fyrirhugaðar framkvæmdir með beinum hætti.

12.1.2 Svæðisskipulag

Ekkert svæðisskipulag er í gildi á framkvæmdasvæðinu eða í nálægð við það.

12.1.3 Aðalskipulag Sveitarfélagsins Ölfuss 2020-2036

Aðalskipulag Sveitarfélagsins Ölfuss 2020-2036 var staðfest af Skipulagsstofnun þann 21. nóvember 2022. Á mynd 12.1 má sjá afmörkun iðnaðarsvæðis á Hellisheiði fyrir jarðvarmavirkjun og orkuvinnslusvæði á útdrætti úr aðalskipulagsupprætti.

Í greinargerð aðalskipulags er fyrirhugað framkvæmdasvæði á skilgreindu iðnaðarsvæði merktu I21 Hellisheiði og landnotkun skilgreind með eftirfarandi hætti:⁴¹

„Í gildi er deiliskipulag fyrir 1007 ha svæði. Gert er ráð fyrir svæði til jarðvarmavirkjunar og tengdrar starfsemi. Áætluð rafmagnsframleiðsla virkjunar verður 303MW og varmaframleiðsla allt að 400MW. Á um 112 ha iðnaðarsvæðis til vesturs komi hreinleg starfsemi sem ekki valdi mengun með ryki, lykt eða útblæstri og valdi ekki mengun á grunnvatni. Á svæðið komi starfsemi sem nýti afurðir frá Hellisheiðavirkjun, s.s. heitt og kalt vatn, gufu eða skiljuvatn.“

Framkvæmdahraði og hugsanleg áfangaskipting iðnaðarsvæða á Hellisheiði verður háð niðurstöðum á þeim rannsóknum sem fram munu fara á fyrirhuguðum iðnaðarsvæðum og ekki verður veitt framkvæmda- eða byggingaleyfi fyrir nýjum virkjunum fyrr en rannsóknir sýna að virkjunarsvæðum verði ekki ofgert og að staðið verði að mengunarvörnum á fullnægjandi hátt, t.a.m. hreinsun brennisteinsvetnis en í reglugerð 514/2010 er kveðið á um styrk brennisteinsvetnis í andrúmslofti og sett fram viðmið sem fylgja þarf eftir.“

Í greinargerð aðalskipulags er núverandi niðurrennsli svæði við Gráuhnúka á skilgreindu iðnaðarsvæði merktu I20 og landnotkun skilgreind með eftirfarandi hætti:

„Ekkert deiliskipulag er í gildi. Gert er ráð fyrir orkuvinnslusvæði á jarðhita fyrir Hellisheiðavirkjun. Framkvæmdin felur í sér vinnslu jarðhita, vegi, borteiga, borholur, gufuveitu, niðurrennsli.“

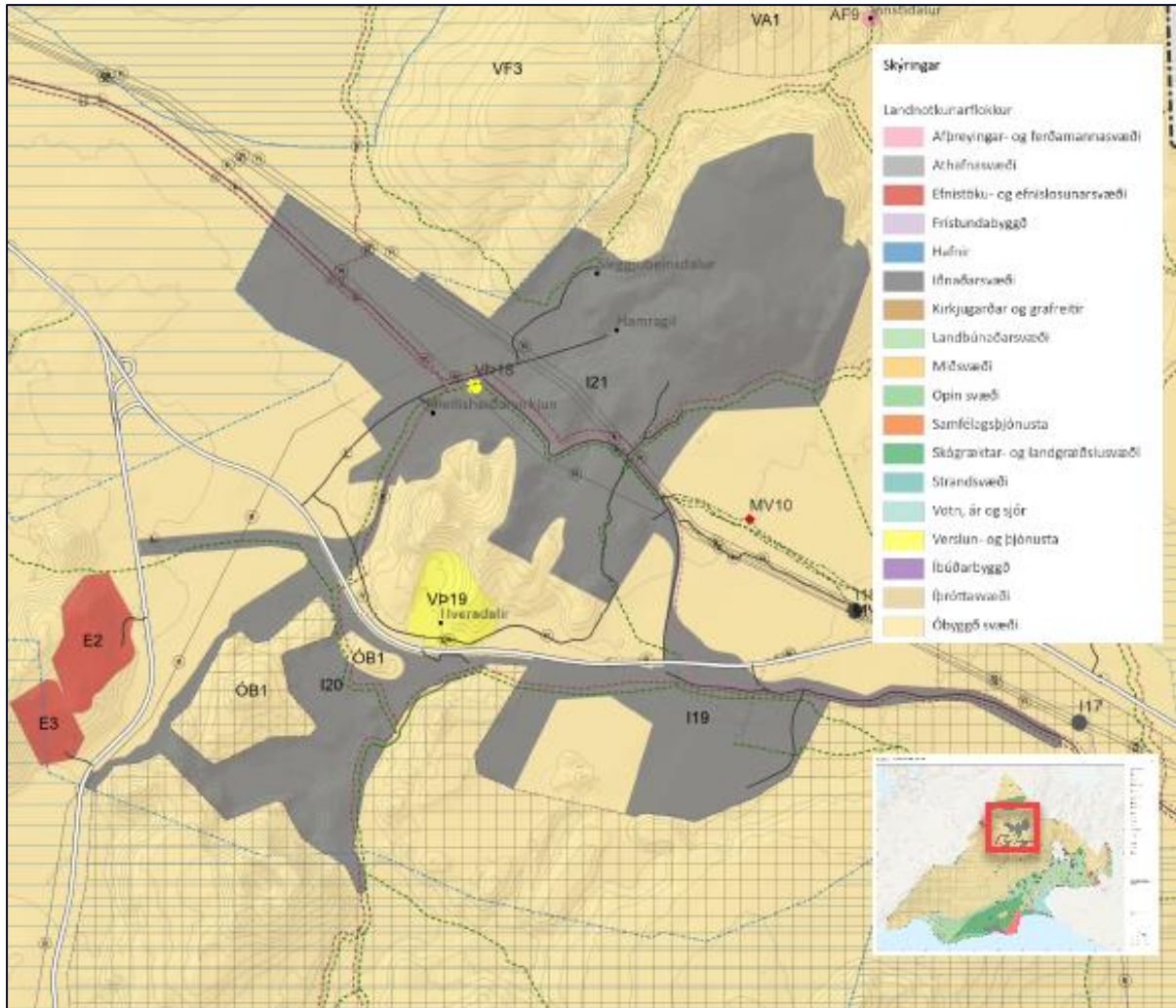
Í greinargerð aðalskipulags eru jafnframt stefna um iðnaðarsvæði í dreifbýli Ölfuss þar sem meðal annars kemur fram að:

- Að stuðlað verði að uppbyggingu iðnaðarsvæða til að renna styrkari stoðum undir atvinnulíf og byggð á svæðinu.

⁴¹ Aðalskipulag Sveitarfélagsins Ölfuss 2020-2036. Greinargerð.
<http://skipulagsaaetlanir.skipulagsstofnun.is/skipulagvefur/display.aspx?countyno=8717>

- Að uppbygging iðnaðarsvæða verði í sátt við náttúruna og þess gætt að ekki verði raskað sérstökum jarðmyndunum eða náttúruminum, fágætum tegundum dýra og plantna og búsvæðum þeirra eftir því sem við á.
- Að tekið sé tillit til umhverfis- og náttúruverndarsjónarmiða við orkuvinnslu og uppbyggingu annars konar iðnaðar. Þess skal gætt að framkvæmdir gangi ekki á sérkenni þess og hlífi sem mest óröskuðum svæðum.
- Að ávallt verði fullkomnustu tækni beitt til að draga úr loftmengun frá iðnaði. Við gerð deiliskipulags og veitingu framkvæmdaleyfa nýrra jarðgufuvirkjana eða stóriðju verði sett stíf skilyrði um mengunarvarnir.
- Að afmörkun og staðsetning stærri iðnaðarsvæða taki mið af nálægð við orkuvinnslusvæði, núverandi og fyrirhugað flutningskerfi raforku og samgangna, s.s. stofnvegi og stórskipahöfn, til að tryggja að vegalengdir verði sem stýstar.
- Að með samþættingu ólíkra mannvirkja (t.d. vega og lína eða vega og lagna) verði dregið úr neikvæðum umhverfisáhrifum og þau takmörkuð við fáar leiðir. Gera skal ráð fyrir að vegstæði nýtist sem lagnaleið.
- Að á iðnaðarsvæðum verði þess gætt að spilla ekki lífríki, grunnvatni né sérstæðum vatnakerfum, eins og nánar verður skilgreint í deiliskipulagi.

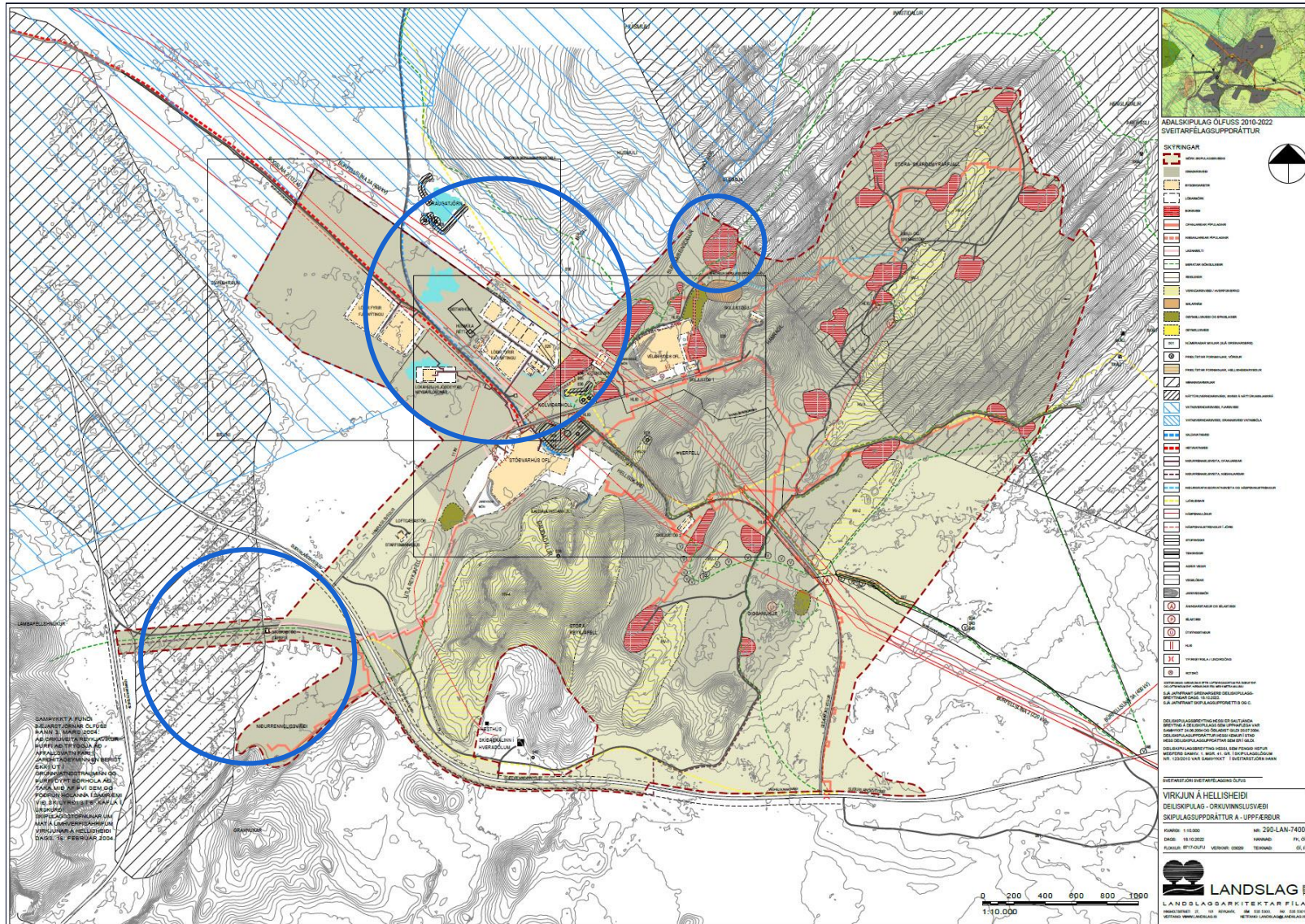
Fyrirhuguð framkvæmd er í samræmi við skilmála landnotkunar I21 um hreinlega starfsemi sem ekki valdi mengun og nýti afurðir Helligshéiðarvirkjunar. Þá fylgir hún viðmiðum um hreinsun brennisteinsvetnis. Þá er I20 skilgreint sem iðnaðarsvæði og niðurrenslissvæði, en ekki er sérstaklega gerð grein fyrir starfsemi Carbfix á svæðinu að öðru leyti. Fyrirhuguð framkvæmd fellur sérstaklega vel að stefnu aðalskipulags um iðnaðarsvæði.



Mynd 12.1: Útdráttur úr aðalskipulagsupprætti Sveitarfélagsins Ölfuss 2020-2036.

12.1.4 Deiliskipulag

Deiliskipulag Helliheiðarvirkjunar tók gildi 20. júlí 2004 (**mynd 12.3**). Á deiliskipulaginu hafa verið gerðar 17 breytingar til þessa dags. Fyrirhuguð framkvæmd felur í sér borun niðurdælingarhola í Jarðhitagarði og skilgreindum borsvæðum í Húsmúla, Sleggjubeinsdal, Þrengslum og við Gráuhnúka og lagnir tengdum niðurdælingarkerfinu frá föngunaraðilum að niðurdælingarholum Carbfix. Þá er gert ráð fyrir stjórnbyggingum innan Jarðhitagarðs og borsvæða, allt að 100 m² að stærð, sem hýsa vöktunar- og stýribúnað. Gert er gert ráð fyrir allt að 30 m² kúluhúsum á niðurdælingarholum til að hlífa þeim við veðurálagi. Gert er ráð fyrir að öll ný niðurdæling geti verið innan lóða í Jarðhitagarði en jafnframt er þeim möguleika haldið opnum að dæla niður á núverandi niðurælingarsvæðum; Húsmúla, Þrengslum og við Gráuhnúka auk Sleggjubeinsdals, þar sem fyrir eru borteigur og borholur. Hægt verður að leggja lagnir að mestu í núverandi lagnabeltum og á iðnaðarsvæðinu. Samkvæmt skilmálum deiliskipulags er mesta leyfilega hæð mannvirkja í Jarðhitagarði 11 m yfir aðliggjandi landi, þó leyfilegt sé að hafa hæð einstaka búnaðar hærri.



Mynd 12.2: Deiliskipulag orkuvinnslusvæðis virkjunar á Hellsheiði⁴².

Ráðgert er að fyrirhuguð framkvæmd verði að mestu leyti innan blárra hringja sem afmarkaðir eru á **mynd 12.3**, og sé í samræmi við gildandi deiliskipulag. Talið frá vinstri til hægri: Á niðurdælingarsvæði í Þrengslum og við Gráuhnúka, í Jarðhitagarði, og á núverandi borteigum í Húsmúla og í Sleggjubeinsdal. Haft verður samráð við Sveitarfélagið Ölfus um þörf fyrir óverulega eða verulega breytingu á deiliskipulagi eftir því sem við á, til að mynda byggingarreit fyrir stjórnbyggingar á núverandi borsvæðum. Þar sem endanleg staðsetning þeirra verður ákveðin í hverju verkefni fyrir sig er ekki tímabært að óska eftir slíkri breytingu

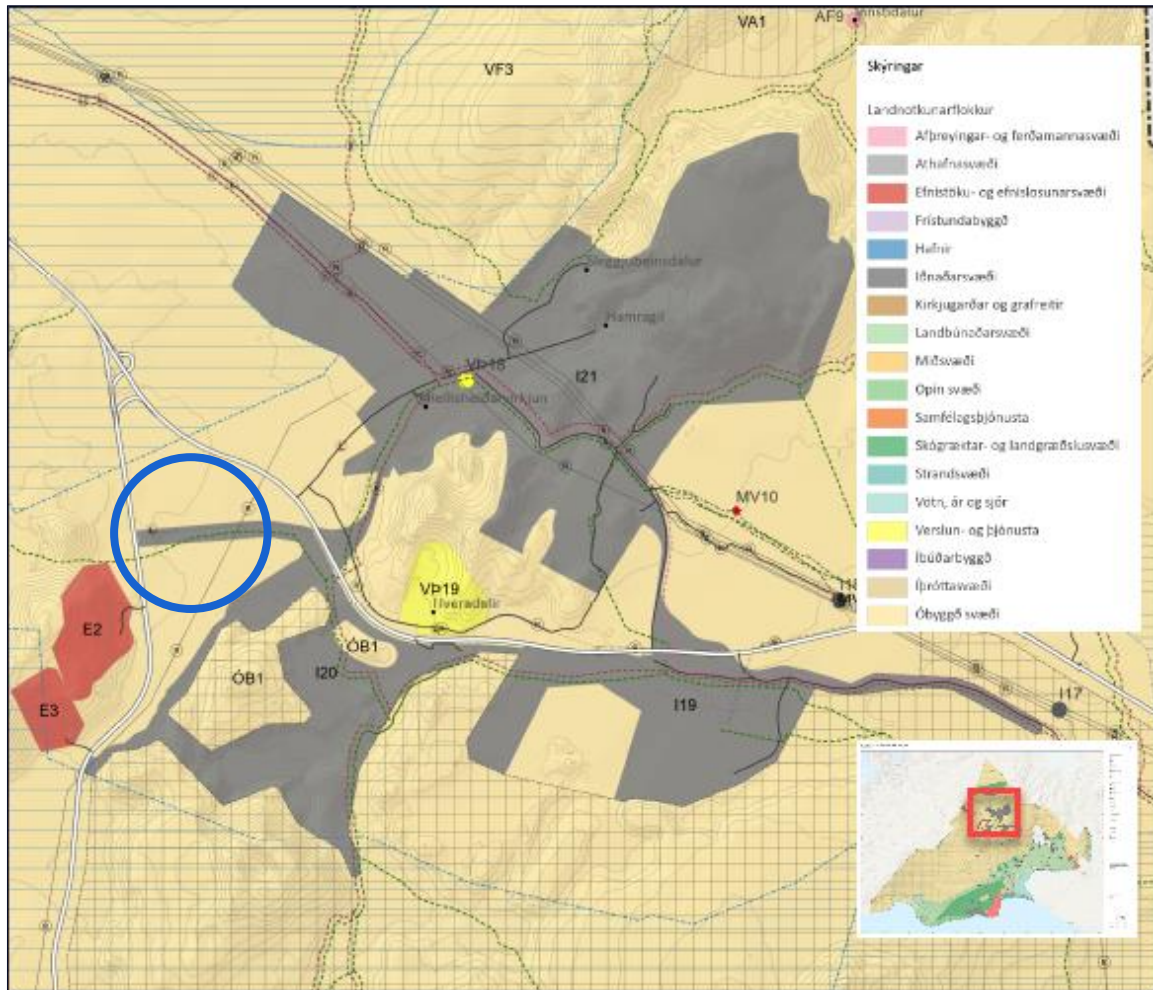
12.2 Verndarákvæði og takmörkun á landnotkun

Í gildi eru lög nr. 60/2013 um náttúruvernd. Náttúruverndarsvæði taka til friðlýstra svæða og afmarkaðra búsvæða friðlýstra tegunda sem vernduð eru, svæði og náttúrumyndanir á B- og C-hluta náttúruminjaskrár og afmörkuð svæði á landi og sjó sem njóta verndar samkvæmt öðrum lögum vegna náttúru eða landslags.

Fyrirhuguð framkvæmd er á iðnaðarsvæði í aðalskipulagi Sveitarfélagsins Ölfuss og innan deiliskipulags virkjunar á Hellisheiði.

Framkvæmdin er ekki í nálægð við friðuð svæði (A-hluti) eða svæði á B-hluta náttúruminjaskrár. Eitt svæði á C-hluta náttúruminjaskrár teygir sig inn á niðurdælingarsvæði í Þrengslum, sjá afmörkun með bláum hring á **mynd 12.4**. Um er að ræða svæði 753 sem lýst er með eftirfarandi hætti: „*Eldborgir við Lambafell, Ölfushreppi, Ámessýslu. (1) Eldvörpin, hrauntraðirnar frá þeim ásamt hrauninu umhverfis. (2) Formfagar eldstöðvar frá sögulegum tíma.*“

Framkvæmdin er er á þegar röskuðu svæði á núverandi niðurdælingarsvæði í Þrengslum og ekki gert ráð fyrir stækkun á iðnaðarsvæði umfram það sem nú er vegna framkvæmdanna.



Mynd 12.3: Borsvæði í þrengslum er innan svæðis N-753 á C-hluta náttúruminjaskrá, sjá bláan hring á mynd.

Í deiliskipulagi virkjunar á Hellisheiði eru afmarkaðar jarðmyndanir skilgreindar sem hverfisverndaðar. Fyrirhuguð framkvæmd er ekki í nálægð við hverfisvernduð svæði.

Framkvæmdin er utan vatnsverndarsvæða samkvæmt aðalskipulagi Ölfuss og deiliskipulagi Hellisheiðarvirkjunar. Í gildandi deiliskipulagi eru skilmálar vegna starfsemi á svæðinu í samræmi við fjarsvæði vatnsverndar og vísað þar í samþykkt um verndarsvæði vatnsbóla höfuðborgarsvæðisins nr. 555/2015.

Í samræmi við lög nr. 80/2012 um menningarminjar hefur fornleifaskráning farið fram í tengslum við umhverfismat virkjunar á Hellisheiði. Fyrirhuguð framkvæmd er öll á þegar röskuðum svæðum, þar sem fornleifaskráning hefur þegar farið fram og hefur ekki áhrif á fornminjar á svæðinu.

12.3 Niðurstaða

Skipulagsáætlanir og aðrar áætlanir stjórnvalda marka stefnu um landnotkun.

Tafla 12.1: Samspil framkvæmdar við landnotkun.

Landnotkun	Samspil framkvæmdar við landnotkun
Landsskipulagsstefna	Stefna landsskipulags tekur ekki til þátta er snerta fyrirhugaðar framkvæmdir með beinum hætti.
Svæðisskipulag	Ekkert svæðisskipulag er í gildi á framkvæmdasvæðinu eða í nálægð við það.
Aðalskipulag	Framkvæmdin fellur vel stefnu aðalskipulags Ölfuss um landnotkun á iðnaðarsvæðinu á Hellisheiði og viðmið um hreinsun brennisteinsvetnis. Þá eru skilgreind niðurdælingarsvæði á iðnaðarsvæðinu. Ekki er þó sérstaklega gerð grein fyrir starfsemi Carbfix á svæðinu í aðalskipulaginu.
Deiliskipulag	Gert er ráð fyrir að fyrirhuguð framkvæmd verði í samræmi við gildandi deiliskipulag fyrir Hellisheiðarvirkjun. Haft verður samráð við Sveitarfélagið Ölfus um þörf fyrir óverulega eða verulega breytingu á deiliskipulagi eftir því sem við á, t.d. vegna stjórnbygginga Carbfix þegar endanleg staðsetning liggur fyrir.
Náttúruvernd	Framkvæmdin mun ekki hafa áhrif á hverfisverndarsvæði, svæði á náttúruminjaskrá eða jarðmyndanir sem njóta verndar skv. 61. gr. náttúruverndarlaga.
Vatnsvernd	Framkvæmdin hefur ekki áhrif á vatnsverndarsvæði samkvæmt aðalskipulagi Ölfuss og deiliskipulagi Hellisheiðarvirkjunar. Við framkvæmdina verður farið að skilmálum gildandi deiliskipulags vegna starfsemi á virkjunarsvæðinu.
Fornleifavernd	Framkvæmd hefur ekki áhrif á fornminjar á svæðinu.

13 Mótvægisáðgerðir og vöktunaráætlun

13.1 Mótvægisáðgerðir

Í þeim tilgangi að halda umhverfisáhrifum í lágmarki eru settar fram mótvægisáðgerðir eða áherslur til þess að koma í veg fyrir eða draga úr áhrifum á hvern og einn umhverfisþátt. Þessar áherslur eru teknar saman hér (**tafla 13.1**) og tilgreint hvenær gripið er til ráðstafana. Einnig tekið fram hver ber ábyrgð á framfylgd áðgerðarinnar.

Tafla 13.1: Samantekt á mótvægisáðgerðum til að draga úr umhverfisáhrifum niðurdælingar CO₂.

Umhverfisþáttur	Mótvægisáðgerðir	Tímasetning	Ábyrgð
Geymslugeymir	<ul style="list-style-type: none"> Ef vöktunarniðurstöður sýna meiri áhrif niðurdælingar CO₂ en var spáð verður forðaðfræðilíkanið uppfært með hliðsjón nýjum upplýsingum og unnin ný spá um dreifingu CO₂. Ef nýir líkanreikningar sýna að búast megi við neikvæðum áhrifum á grunnvatn eða geymslugeyminn, þá þarf að endurskoða vöktunaráætlunina og staðsetningu niðurdælingarhola. Verði vart við leka CO₂ til yfirborðs verða gerðar ráðstafanir til úrbóta sem byggja á viðbragðsáætlun og vöktunaráætlun. Ráðstafanir eru útfærðar í skrefum eftir alvarleika. Í fyrsta skrefi er stuðst við frekari vöktun, sem lýst er í vöktunaráætlun. Í framhaldi eru gerðar breytingar á rekstrarlegum stikum (t.d. þrýstingi eða flæði) á meðan orsök leka er könnuð. Sé orsök leka óþekkt er niðurdæling stöðvuð tímabundið og niðurdælingarhola skoðuð og hugsanlega gert við hana. Sé viðgerð útilokuð gæti reynst nauðsynlegt að loka holunni og færa niðurdælingu í aðrar holur, eða bora nýja. 	Þegar niðurstöður vöktunar gefa tilefni til.	Carbfix
Vatn	<ul style="list-style-type: none"> Vegna notkunar olíu á tækjum verður tryggt að öll séu meðvituð um rétt viðbrögð við mengunarslysum, hafi fengið viðeigandi fræðslu og séu með réttan búnað á sér (mengunar-varnarsett o.fl.), einkum á framkvæmdasvæði Carbfix innan Jarðhitagarðs, við Húsmúla og í Sleggjubeinsdal.. Carbfix leggur áherslu öflugt eftirlit verði með niðurdælingunni svo hægt verði að bregðast við ef vísbendingar eru um neikvæð áhrif á grunnvatn. Ef vöktunarniðurstöður sýna meiri áhrif niðurdælingar CO₂ en var spáð verður forðaðfræðilíkanið uppfært með hliðsjón nýjum gögnum og unnin ný spá um dreifingu CO₂. Ef nýir líkanreikningar sýna að búast megi við neikvæðum áhrifum á grunnvatn eða geymslu-geyminn, þá þarf að endurskoða 	Útboð/- framkvæmdatími Þegar niðurstöður vöktunar gefa tilefni til.	Carbfix Carbfix

	vöktunar-áætlunina og fyrirhugaða staðsetningu niðurdælingarhola. <ul style="list-style-type: none"> Leiði reglubundin uppfærsla á forðafraeðilíkani fyrir geymslugeymi í millikerfi í ljós að mengun geti borist frá niðurdælingarholum til vatnsbólans í Engidal Carbfix meta hvort endurskoða þurfi áform um staðsetningu niðurdælingar til að koma í veg fyrir neikvæð áhrif á vatnsból. 	Þegar niðurstöður líkanreikninga gefa tilefni til.	Carbfix
Jarðskjálftavirkni	<ul style="list-style-type: none"> ON vinnur samkvæmt verklagi um niðurdælingu og reglum Orkustofnunar nr. OS-2016-R01-01, um viðbúnað og viðbrögð við jarðskjálftavá vegna losunar vökva djúpkerfi. Carbfix mun vinna eftir sama verklagi við niðurdælingu í djúpkerfi. Það miðar að því að minnka hættu á örvaðri skjálftavirkni með því að gera ekki skyndilegar breytingar á niðurdælingu og sendar eru út tilkynningar til hagsmunaaðila þegar hefja á niðurdælingu eða gera verulegar breytingar. Í samræmi við ráðleggingar ÍSOR mun Carbfix auka niðurdælingu CO₂ í millikerfi í jarðhitagarði og öðrum fyrirhuguðum borsvæðum á geymslusvæðinu á Hellisheiði í skrefum og fylgjast vel með jarðskjálftavirkni þegar boranir hefjast, niðurdæling hefst og þegar niðurdæling er aukin. 	Við upphaf niðurdælingar í og við breytingar	Carbfix
Loftslag	<ul style="list-style-type: none"> Ekki þörf á mótvægisáðgerðum vegna áhrifa á loftslag. 		

13.2 Stýringar- og vöktunaráætlun

Stýring

Stýringaráætlun niðurdælingar í CO₂ geymslugeymi á Hellisheiði byggir á fyrirliggjandi áhættugreiningu og viðbragðsáætlun auk áætlana niðurdælingarverkefna sem þegar eru í rekstri á Hellisheiði.

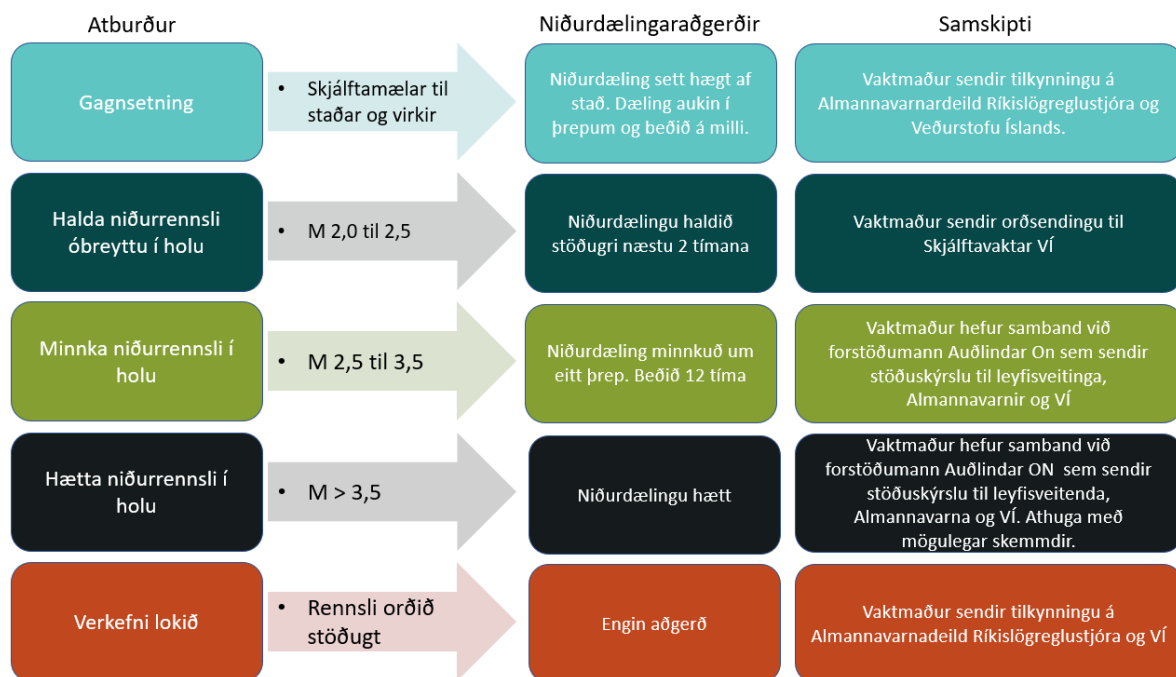
Megin aðgerðir til að fyrirbyggja mögulega atburði í rekstri niðurdælingar eru sem hér segir:

1. Viðhalda vatnsþrýstingi niðurdælingar hærrí en vatnsþrýstingi á niðurdælingardýpi.
2. Tryggja að hlutþrýstingur CO₂ í niðurdælingarvökva sé lægri en vatnsþrýstingur vatnssúlunnar á niðurdælingardýpi.
3. Tryggja að pH gildi niðurdælingarvökva sé lægra en grunnvatns á niðurdælingardýpi.
4. Tryggja að hitastig niðurdælingarvökva sé lægra grunnvatns á niðurdælingardýpi.
5. Tryggja rétt dýpi niðurdælingarholu, sem og gæði og dýpi fóðringar í hverri holu miðað við staðsetningu, dýpi grunnvatns og hitaferil í holunni.
6. Tryggja viðeigandi vöktun og gæðaeftirlit með niðurdælingarkerfi og vöktunarholum.

Fylgst er með þrýstingi við holutopp með sírita. Annars vegar er mældur þrýstingur á holutoppi. Hins vegar er mældur þrýstingur á lögn sem liggur að niðurdælingarkerfi. Ef þrýstingur fellur niður fyrir ákveðið viðmið er lokað fyrir flæði að niðurdælingarkerfinu og viðvörðun er send í stjórnkerfi.

Auk jarðskjálftanets Veðurstofu Íslands (VÍ) rekur ÍSOR skjálftanet á Hellisheiði fyrir ON og er fylgst með jarðskjálftum á vinnslusvæði Hellisheiðarvirkjunar, m.a. örvaðri skjálftavirkni. Áður en niðurdæling hefst í holu verður tekið mið af óháðu frummati á jarðskjálftahættu sem unnið var af ÍSOR, í samræmi við reglur Orkustofnunar um viðbúnað og viðbrögð við jarðskjálftavá vegna losunar á vökva í jörðu um borholur nr. OS-2016-R01-01 (**viðauki 3**).

Hætta á örvaðri skjálftavirkni vegna niðurdælingar CO₂ á Hellisheiði er lágmörkuð með því að stýra rennslis hraða í niðurdælingarholur. Vöktun á skjálftavirkni byggir á svokölluðu umferðarljósakerfi sem komin er góð reynsla á⁴³ og hefur verið í notkun á Hellisheiði frá 2012 fyrir niðurdælingu á skiljuvatni frá Hellisheiðarvirkjun^{44,45}. Umferðarljósakerfið byggir á því að stýra hraða flæðis í niðurdælingarkerfinu, sér í lagi við upp- og niðurkeyrslu kerfisins. Rannsóknir á örvaðri skjálftavirkni benda til þess að helsta orsök örvaðrar skjálftavirkni séu snöggar breytingar í niðurdælingu og miðar umferðarljósakerfið að því að auka og draga úr flæði í skrefum til að halda skjálftavirkni í lágmarki. Innbyggt í kerfið er jafnframt samskiptaplan og tilkynningar til hagsmunaaðila þegar svo ber undir. Umferðarljósakerfi fyrir stýringu á niðurrennsli er lýst á **mynd 13.1**.



Mynd 13.1: Umferðarljósakerfi fyrir niðurdælingu á Hellisheiði.

Vöktun

Vöktunaráætlun niðurdælingar í CO₂ geymslugeymi á Hellisheiði byggir á á rannsóknum og rekstrarreynslu niðurdælingar Carbfix á svæðinu sl. áratug. Auk þess fylgir hún tilskipun 2009/31/EC um geymslu koldíoxíðs í jörðu og reglugerð nr. 1430/2022 um geymslu koldíoxíðs í jörðu.

⁴³ AltaRock Energy, Inc., 2011.

⁴⁴ Thorsteinsson & Gunnarsson, 2014.

⁴⁵ Hjörleifsdóttir o.fl., 2021.

Megin tilgangur vöktunaráætlunar er að:

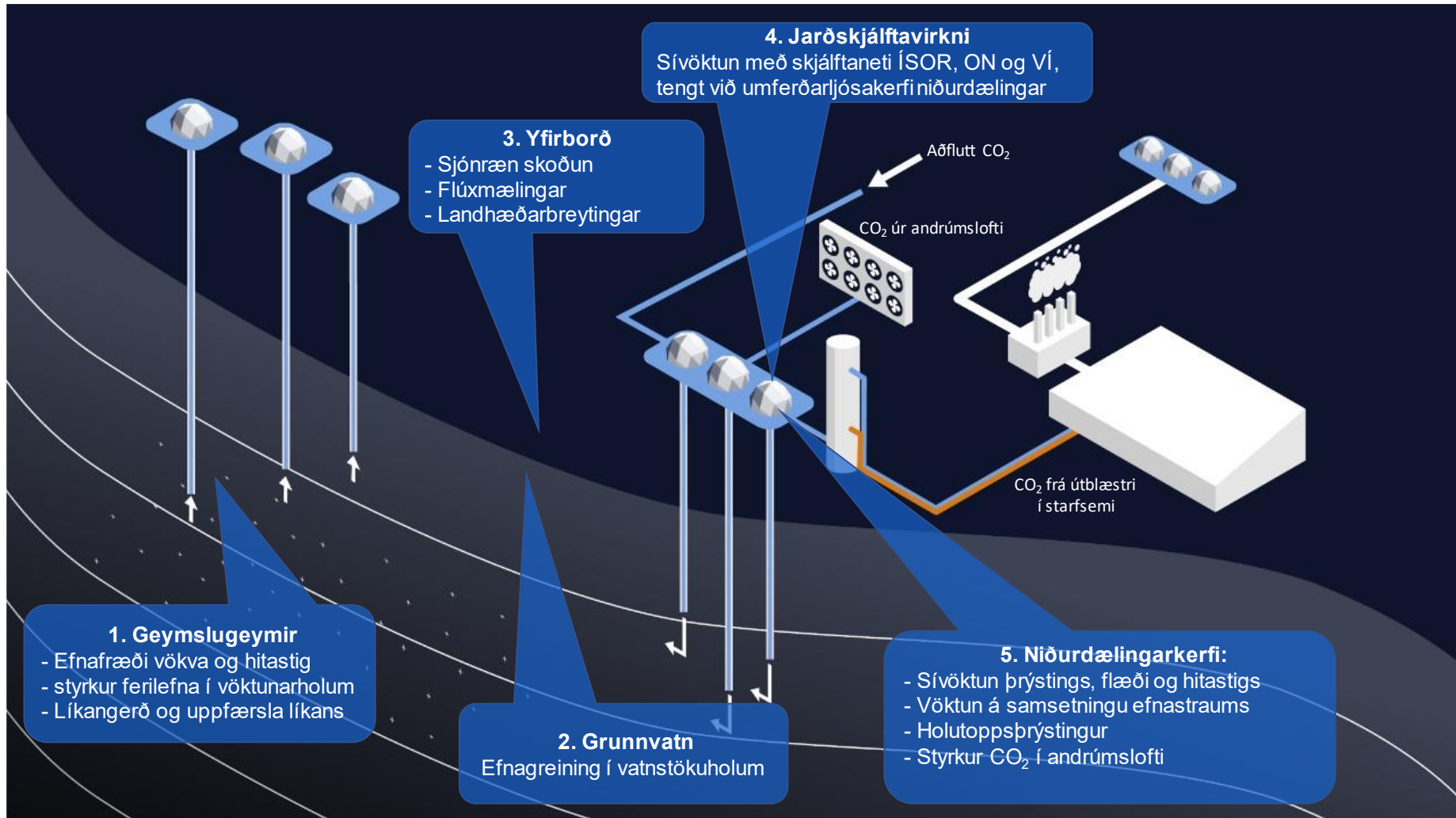
- i. tryggja öruggan og skilvirkan rekstur allra kerfa,
- ii. gera grein fyrir magni CO₂ sem dælt er niður og steinrennt og
- iii. vakta afdrif CO₂ sem dælt er niður, í geymslugeyminum.

Það síðastnefnda felst einnig í steinrenningu CO₂ og þar með geymslu þess í jarðlögum ásamt því að samræma niðurstöður við líkanareikninga, og að sannreyna að hvorki leki eða frávik séu til staðar eða önnur óæskileg umhverfisáhrif.

Vöktunaráætlun nær yfir eftirfarandi vöktunarpætti sem einnig eru sýndir á **mynd 13.2**.

1. Geymslugeymir
2. Grunnvatn
3. Yfirborð
4. Jarðskjálftavirkni
5. Niðurdælingakerfi

Vöktun á sér stað allt frá því áður en niðurdæling hefst, meðan á henni stendur og eftir lokun geymslusvæðis í samræmi við lokunaráætlun sem fjallað er um í kafla 5.8 hér að framan. Gerð er grein fyrir vöktun ofangreindra vöktunarpátta í **töflu 13.2**. Gert er ráð fyrir að vöktunaráætlunin verði uppfærð þegar ástæða þykir til, minnst fimm ára hvert ár. Frekari upplýsingar um fyrirhugaða vöktun geymslusvæðis Carbfix á Hellisheiði má finna í **viðauka 4**.



Mynd 13.2: Yfirlit yfir fyrirhugaða vöktun niðurdælingar CO₂ til geymslu í jarðlögum á Helligshéiði.

Tafla 13.2: Vöktunaráætlun niðurdælingar CO₂ til geymslu í jörðu á Hellisheiði

Vöktunar- þáttur	Vöktun	Markmið	Fyrir gangsetningu	Tíðni						Eftir lokun
				1	2	3	4	5	6+	
Geymslu- geymir	Heildstæð greining á efnafræði, hitastigi og þrýstingi og mæling á vatnsborði í vöktunarholum	Vöktun á geymslugeymi og steinrenningu, samræmi við líkan af geymslugeymi. Sannreyna að enginn leki sé til staðar.	3 ^a	Há → lág tíðni ^b						1-1/5 ^c
	Styrkur ferilefna í vöktunarholum		Há → lág tíðni ^b							
	Hermireikningar (Jarðefnafræðilegir reikningar)		d	1	1	1	1/2 ^e	1/2	1/2	1/2-1/5 ^c
	Hermireikningar (Forðafraeðilíkon)		d	1	1	1	1/2	1/2	1/2	1/2-1/5 ^c
Grunnvatn	Efnagreining í skilgreindum vatnstökuholum í nágrenni við geymslusvæðið.	Bera kennsl á hugsanleg áhrif niðurdælingar á grunnvatn	Árlega							
Yfirborð	Sjónræn skoðun á niðurdælingarsvæði	Enginn leki CO ₂ frá niðurdælingarkerfi eða úr geymslugeymi umfram náttúrulegan bakgrunn á svæðinu		12	12	12	12	12	12	
	Flæðimælingar á yfirborði		1		1			1	1/4 ^e	
	Landhæðarbreytingar (InSAR)	Áhrif á yfirborð		Fimmta hvert ár						
Jarðskjálfta- virkni	Rekstur á staðbundnu jarðskjálftaneti (ÍSOR, ON)	Lágmarka hættu á aukinni skjálftavirkni	Síritun							
	Vöktun í gegnum skjálftanet Veðurstofu Íslands		Síritun							
Niðurdælingarkerfi	Þrýstingur, hitastig og flæði efnastrauma við inntak niðurdælingarhola	Vöktun á CO ₂ sem dælt er niður, magni og mögulegum óhreinindum í niðurdælingarvökva og gasi. Tryggja örugga niðurdælingu og að engin losun CO ₂ vegna niðurdælingar um jarðveg eða vatn (samanburður við gasbóluprýsting)	Síritun							
	Sýnatoka og greining efnasamsetningar vatns, CO ₂ , H ₂ S og snefilefna í vökva við inntak niðurdælingahola		2	2	2	2	2	2		
	Styrkur CO ₂ í andrúmslofti (og H ₂ S þar sem við á) inni í niðurdælingarmannvirki	Enginn leki CO ₂ frá niðurdælingarkerfi	Síritun							
	Grunnvatnsborðsmæling eða skráning á þrýstingi niðurdælingarholu	Tryggja örugga niðurdælingu og að engin losun CO ₂ vegna niðurdælingar um jarðveg eða vatn (samanburður við gasbóluprýsting)	1							

14 Heildaráhrif og niðurstaða

Í **töflu 14.1** má samantekt á niðurstöðu umhverfismats niðurdælingar CO₂ til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði.

Tafla 14.1: Samantekt á umhverfisáhrifum geymslu CO₂ á Hellisheiði.

Umhverfisþáttur	Áhrif	Samantekt
Geymslugeymir	Óveruleg	<p>Á rekstrartíma niðurdælingar verður allt að 47.000 tonnum af CO₂ úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar dælt niður árlega í allt að 30 ár í djúpkerfi geymslusvæðis Carbfix á Hellisheiði, og eru áhrif á geymslugeymi millikerfis og djúpkerfis metin óveruleg.</p> <p>Niðurdæling Carbfix í allt að 30 ár í millikerfi geymslusvæðis Carbfix á allt að 59.000 tonnum af CO₂ árlega sem fangað verður úr andrúmslofti í lofthreinsiverum í Jarðhitagarðinum á Hellisheiði er metin hafa óveruleg áhrif á geymslugeymi millikerfis og djúpkerfis.</p> <p>Niðurdæling í allt að 30 ár í millikerfi geymslusvæðisins á allt að 300.000 tonnum CO₂ á ári úr andrúmslofti frá nýjum aðilum eða frá nýrri starfsemi á athafnasvæði ON, eða flutt á staðinn til niðurdælingar er metin hafa óveruleg áhrif á geymslugeymi millikerfis og djúpkerfis.</p>
Grunnvatn	Óveruleg	<p>Á framkvæmdatíma fyrirhugaðrar niðurdælingar Carbfix á CO₂ á Hellisheiði, eru áhrif á grunnvatn á framkvæmdatíma metin óveruleg. Jafnframt eru áhrif á grunnvatn og vatnsból á rekstrartíma vegna niðurdælingar á CO₂ í allt að 30 ár, hvort heldur er í djúpkerfi eða millikerfi geymslusvæðis Carbfix á Hellisheiði, metin óveruleg.</p>
Jarðskjálftavirkni	Óveruleg	<p>Niðurstaða umhverfismats niðurdælingar CO₂ til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði, hvort heldur er í djúpkerfi eða millikerfi geymslusvæðis Carbfix, er að framkvæmdin hafi óveruleg áhrif á jarðskjálftavirkni.</p>
Loftslag	Verulega jákvæð	<p>Niðurdæling CO₂ í djúpkerfi og millikerfi á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði mun draga úr losun gróðurhúsalofttegunda í andrúmsloft á landsvísu og CO₂ verður hreinsað úr í andrúmslofti í lofthreinsiverum. Verkefnið styður við íslensk og alþjóðleg loftslagsmarkmið og eru áhrif á loftslag metin verulega jákvæð.</p>

15 Leyfismál

Fyrirhugaðar framkvæmdir við uppbyggingu og rekstur CO₂ geymslusvæðis Carbfix á Hellisheiði eru háðar eftirfarandi leyfum:

- Framkvæmdaleyfi Sveitarfélagsins Ölfuss, samkvæmt 14. gr. skipulagslaga nr. 123/2010 og reglugerð um framkvæmdaleyfi nr. 772/2012.
- Byggingarleyfi byggingarfulltrúa Sveitarfélagsins Ölfuss, samkvæmt 9. gr. laga um mannvirki nr. 160/2010 og byggingarreglugerð nr. 112/2012.
- Starfsleyfi til geymslu koldíoxíðs í jörðu sem Umhverfisstofnun veitir samkvæmt 33. gr. c í lögum nr. 7/1998, um hollustuhætti og mengunarvarnir og 6 gr. reglugerðar nr. 1430/2022 um geymslu koldíoxíðs í jörðu.
- Starfsleyfi sem Heilbrigðiseftirlit Suðurlands veitir samkvæmt 6. gr. laga nr. 7/1998, um hollustuhætti og mengunarvarnir og 5. gr. reglugerðar nr. 550/2018, um losun frá atvinnurekstri og mengunarvarnaeftirlit, samanber X. viðauka, lið 10.7. Þar er um að ræða tímabundinn atvinnurekstur vegna aðstöðu fyrir verktaka og starfsmenn á framkvæmdatíma.
- Leyfi Minjastofnunar Íslands, ef við á vegna fornleifa, samkvæmt 21. gr. laga nr. 80/2012, um menningarminjar.

16 Samráð og kynningar

16.1 Samráð við undirbúning verkefnisins

Fyrirhuguð framkvæmd var kynnt Skipulagsstofnun á fundi 4. nóvember 2021. Framkvæmdin var kynnt fyrir Sveitarfélaginu Ölfus 14. desember 2021 og Umhverfisstofnun á forsamráðsfundi Skipulagsstofnunar 16. desember 2021. Framkvæmdin var kynnt fyrir Hveragerðisbæ 26. janúar 2022. Fyrirhuguð framkvæmd var kynnt á fundi um umhverfis- og loftslagsmál með heilbrigðisfulltrúum á starfssvæðum OR samstæðunnar 4. febrúar 2022.

Áður hafði fyrirhuguð framkvæmd verið kynnt fyrir fjölmörgum hagsmunaaðilum í tengslum við mótun löggjafar um niðurdælingu koldíoxíðs, sem varð að lögum nr. 12/2021, og fólu meðal annars í sér breytingu á lögum nr. 7/1998 um hollustuhætti og mengunarvarnir, lögum nr. 106/2000 um mat á umhverfisáhrifum (felld úr gildi með lögum nr. 111/2021 um umhverfismat framkvæmda og áætlana) og lögum nr. 70/2012 um loftslagsmál.

Fulltrúar Landverndar og Náttúruverndarsamtaka Íslands þáðu boð á starfsstöð og fyrirhugað framkvæmdasvæði Carbfix á Hellisheiði 4. mars 2021 þar sem starfsemi Carbfix var kynnt. Fulltrúar frá umhverfis- og auðlindaráðuneyti, utanríkisráðuneyti, Skipulagsstofnun og Umhverfisstofnun þáðu boð á starfsstöðvar og fyrirhugað framkvæmdasvæði 25. maí 2021 þar sem starfsemi Carbfix var kynnt. Þá var verkefnið kynnt fyrir Ungum umhverfissinum í heimsókn á Hellisheiði 21. október 2021. Að auki hafa ýmsir aðrir fengið kynningu á verkefninu, þar á meðal Heilbrigðiseftirlit Suðurlands, ráðherrar ríkisstjórnarinnar og þingmenn.

16.2 Kynning matsáætlunar

Í kafla 2 hér að framan er fjallað um mat á umhverfisáhrifum og aðkomu almennings í því ferli. Matsáætlun var kynnt í fjórar vikur, frá 22. febrúar til 22. mars 2022, í samræmi við 21. gr. laga nr. 111/2021. Auk auglýsingar í fréttamiðlum og á vefsíðu Skipulagsstofnunar (www.skipulag.is) var matsáætlun kynnt á vefsíðu Carbfix (www.carbfix.com). Einnig kynnti Carbfix matsáætlun á opnum streymisfundi á kynningartíma 10. mars 2022. Þá var matsáætlun kynnt á reglubundnum leyfisveitendafundi Orku náttúrunnar í Hellisheiðarvirkjun, sem er vettvangur til upplýsinga m.a. um fyrirhugaðar framkvæmdir á iðnaðarsvæði Hellisheiðarvirkjunar.

16.3 Áætlun um samráð og kynningu við gerð umhverfismatskýrslu

Carbfix leggur ríka áherslu á að halda hagsmunaaðilum og almenningi öllum upplýstum um framgang umhverfismats meðan vinna við umhverfismat stendur yfir.

Gert er ráð fyrir miðlun upplýsinga til leyfisveitenda og helstu hagaðila á reglubundnum leyfisveitendafundum Orku náttúrunnar í Hellisheiðarvirkjun eftir því sem við. Fundir eru að jafnaði haldnir annan hvern mánuð, en þá sitja meðal annarra fulltrúar frá Sveitarfélaginu Ölfusi, Umhverfisstofnun, Orkustofnun, Heilbrigðiseftirliti Suðurlands, Hveragerðisbæ og Grímsnes- og Grafningshreppi. Þá er gert ráð fyrir miðlun upplýsinga um framgang umhverfismats innan OR og félaga meðan á gerð umhverfismats stendur, meðal annars fyrir framkvæmdastjórn OR sem og stjórn OR.

Haldinn verður opinn kynningarfundur á vegum Carbfix 21. febrúar 2023 á kynningartíma Skipulagsstofnunar á umhverfismatskýrslu. Carbfix ráðgerir einnig að kynna og auglýsa fyrirhugaða framkvæmd og niðurstöður umhverfismats á heimasíðu Carbfix (<https://www.carbfix.com/umhverfismat-hellisheidi/>) og á samfélagsmiðlum fyrirtækisins, meðan á

kynningartíma stendur. Þá er gert ráð fyrir að kynna niðurstöður umhverfismats fyrir leyfisveitendum og umsagnaraðilum á kynningartíma umhverfismatskýrslu.

17 Heimildir

- AltaRock Energy. (2011). *Induced Seismicity Mitigation Plan – Newberry EGS Demonstration*. https://www.altarockenergy.com/projectupdates/Newberry_ISMPlan.pdf
- Clark, D. E., Oelkers, E. H., Gunnarsson, I., Sigfússon, B., Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Aradóttir, E. S. og Gíslason, S. R. (2020). CarbFix2: CO₂ and H₂S 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>
- Egill Árni Guðnason, Þorbjörg Ágústsdóttir, Sveinborg Hlíf Gunnarsdóttir, Iwona Monika Galeczka, Auður Agla Óladóttir, Ásdís Benediktsdóttir og Gunnlaugur M. Einarsson. (2022). *Sérfræðiskýrsla fyrir umhverfismat niðurdælingu CO₂ á Hellisheiði. Grunnástand og hugsanlegar breytingar*. ÍSOR. (Viðauki 3).
- Galeczka, I., Wolff-Boenisch, D., og Gíslason, S. (2013). Experimental Studies of Basalt-H₂O-CO₂ Interaction with a High Pressure Column Flow Reactor: the Mobility of Metals. *Energy Procedia*, 37, 5823–5833. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.505>
- Grímur Björnsson og Hjalti Franzson. (2005). *Hiti og jarðlög í nýjum borholum í Prengslum*. Íslenskar Orkurannsóknir.
- Hjörleifsdóttir, V., Ingvarsson, G., Ratouis, T., Gunnarsson, G., Snæbjörnsdóttir, S. S. og Sigfússon, B. (2021). Ten years of induced earthquakes in the Húsmúli CO₂ injection site, Hellisheiði, Iceland. Sixth International Conference on Engineering Geophysics, Virtual, 25-28 October 2021. *SEG Global Meeting Abstracts*: 96-100. <https://doi.org/10.1190/iceg2021-027.1>
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Khalilabad, M., Axelsson, G., Gíslason, S.R. (2008). Aquifer characterization with tracer test technique; permanent CO₂ sequestration into basalt, SW Iceland. *Mineralogical Magazine*, 72, 121–125.
- Matter, J. M., Stute, M., Snæbjörnsdóttir, S.Ó., Oelkers, E. H., Gíslason, S. R., Aradóttir, E. S., Sigfússon, B., Gunnarsson, I., Sigurdardóttir, H., Gunnlaugsson, E., Axelsson, G., Alfredsson, H. A., Wolff-Boenisch, D., Mesfin, K., Taya, D. F. D. L. R., Hall, J., Dideriksen, K., og Broecker, W. S. (2016). Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science*, 352(6291), 1312–1314. <https://doi.org/10.1126/science.aad8132>
- Orkuveita Reykjavíkur og Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns. (2003). *Virkjun á Hellisheiði. Rafstöð allt að 120 MW og varmastöð allt að 400 MW. Mat á umhverfisáhrifum*.
- Orkuveita Reykjavíkur og Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns. (2005). *Stækkun Hellisheiðarvirkjunar. Mat á umhverfisáhrifum*.
- Ratouis, T. og Vilante, M. (2022). *Model of the injection of CO₂ at Hellisheiði. Possible effects of the proposed CO₂ injection and mineral storage operations*. Carbfix.
- Samþykkt um verndarsvæði vatnsbóla innan lögsagnarumdæma Mosfellsbæjar, Reykjavíkurborgar, Seltjarnarnesbæjar, Kópavogsbæjar, Garðabæjar og Hafnarfjarðarkaupstaðar. (2015). *Stjórnartíðindi B-deild, nr. 555*.

<https://www.stjornartidindi.is/Advert.aspx?RecordID=85ea6132-ad45-4dab-88ec-b0621e493ff4>

- Sigfússon, B., Arnarson, M. Þ., Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Karlsdóttir, M. R., Aradóttir, E. S., og Gunnarsson, I. (2018). Reducing emissions of carbon dioxide and hydrogen sulphide at Hellisheiði power plant in 2014-2017 and the role of CarbFix in achieving the 2040 Iceland climate goals. *Energy Procedia*, 146, 135–145.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.018>
- Sigrún Tómasdóttir . (2022). *Grunnvatn á Hellisheiði. Grunnástand og möguleg áhrif fyrirhugaðrar framkvæmdar Carbfix um geymslu CO₂ í jarðlögum á Hellisheiði*. Orkuveita Reykjavíkur.
- Skipulagsstofnun. (2005). *Leiðbeiningar um flokkun umhverfisþátta, viðmið, einkenni og vægi umhverfisáhrifa*.
- Snæbjörnsdóttir, S. Ó., Oelkers, E. H., Mesfin, K., Aradóttir, E. S., Dideriksen, K., Gunnarsson, I., Gunnlaugsson, E., Matter, J. M., Stute, M., og Gislason, S. R. (2017). The chemistry and saturation states of subsurface fluids during the in situ mineralisation of CO₂ and H₂S 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>
- Stjórnarráð Íslands. (2021). *Sáttmáli um ríkisstjórnarsamstarf Framsóknarflokks, Sjálfstæðisflokks og Vinstrihreyfingarinnar – græns framboðs*.
<https://www.stjornarradid.is/library/05-Rikisstjorn/Stjornarsattmali2021.pdf>
- Thorsteinsson, H. og Gunnarsson, G. (2014). Induced seismicity– stakeholder engagement in Iceland. *GRC Transactions*, 38, 879–882.
<https://publications.mygeoenergynow.org/grc/1033636.pdf>
- Sveitarfélagið Ölfus (2022). *Aðalskipulag Sveitarfélagsins Ölfuss 2020-2036*.
<http://skipulagsaaetlanir.skipulagsstofnun.is/skipulagvefur/display.aspx?countyno=8717>
- Umhverfisstofnun. (2022). *Vatnaáætlun fyrir Íslands 2022-2027. Drög til kynningar*.
https://ust.is/library/sida/haf-og-vatn/Vatna%C3%A1%C3%A6tlun%202022-2027_DR%C3%96G.pdf
- Umhverfis- og auðlindaráðuneytið. (2020). *Aðgerðaáætlun í loftslagsmálum: Aðgerðir íslenskra stjórnvalda til að stuðla að samdrætti í losun gróðurhúsalofttegunda til 2030* (2. útg.).
<https://www.stjornarradid.is/library/02-Rit--skyrslur-og-skrar/Adgerdaaetlun%20i%20loftslagsmalum%20onnur%20utgafa.pdf>
- Umhverfis- orku og loftslagsráðuneytið. (2022). *Stöðuskýrsla aðgerðaráætlunar í loftslagsmálum 2022*. https://www.stjornarradid.is/library/02-Rit--skyrslur-og-skrar/URN/Stoduskyrsla_Adgerdaaetlun_2022.pdf
- Voight, M. (2022). *Hellisheiði CO₂ injection monitoring plan*. Carbfix.
- Wiese, F., Fridriksson, T. og Ármannsson, H. (2008) *CO₂ fixation by calcite in high-temperature geothermal systems in Iceland*. ISOR. <https://orkustofnun.is/gogn/Skyrslur/ISOR-2008/ISOR-2008-003.pdf>

18 Myndaskrá

Mynd 1.1: Fyrirhuguð borsvæði fyrir geymslu CO ₂ á geymslusvæði Carbfix við Hellisheiðarvirkjun.	3
Mynd 1.2: Skýring á efnafræðilegum ferlum Carbfix tækninnar.	4
Mynd 1.3: Steindabinding CO ₂ í basaltbergrunni. Til vinstri á mynd má sjá ferskt basalt sem ekki hefur hvarfast við CO ₂ . Til hægri má sjá basalt sem hvarfast hefur við CO ₂ . Líkt og sjá má hafa hvítar karbónatsteindir fyllt upp í holurými í berginu.	5
Mynd 2.1: Ferli umhverfismats framkvæmdar.	7
Mynd 3.1: Tímalína niðurdælingar CO ₂ á Hellisheiði.	12
Mynd 3.2: Aðferðir til niðurdælingar á CO ₂ til geymslu í jarðlögum: T.v. niðurdæling á hreinu CO ₂ í setlög. T.h. niðurdæling á CO ₂ leystu í vatni til steinrenningar í jarðlögum.	12
Mynd 3.3: Mismunandi ferli bindingar CO ₂ í jarðlögum og hlutfall þeirra sem fall af tíma fyrir niðurdælingu a) til geymslu í setlögum og b) til steinrenningar í basalti.	14
Mynd 3.4: Aðferðir Carbfix við niðurdælingu CO ₂ . a) Niðurdælingarkerfi þar sem CO ₂ er leyst í vatni í borholu. b) Niðurdælingarkerfi þar sem CO ₂ er leyst í vatni í þvottaturni á yfirborði.	15
Mynd 3.5: Geymslugeymir Carbfix fyrir niðurdælingu á CO ₂ á Hellisheiði. Í öllum tilvikum er CO ₂ dælt í millikerfi á um 350 til 700-1000 m dýpi (vinstra megin), að undanskilinni niðurdælingu á CO ₂ sem á uppruna sinn í jarðhitageyminum er dælt í niðurdælingarholur Hellisheiðarvirkjunar sem boraðar eru í djúpkerfi (hægra megin). Myndin sýnir dýpi niður á lágviðnámskápu er skilur að millikerfi og djúpkerfi.	16
Mynd 5.1: Afstöðumynd af staðsetningum núverandi niðurdælingar- og vöktunarhola og lögnum ásamt mögulegum staðsetningum nýrra niðurdælingar- og vöktunarhola á geymslusvæði Carbfix. Sýnd staðsetning nýrra hola í Jarðhitagarði er eingöngu til skýringar, því staðsetning þeirra verður ákveðin í hverju verkefni fyrir sig í samráði við samstarfsaðila. Þá fer heildarfjöldi nýrra hola ekki yfir 22.	25
Mynd 5.2: Niðurdælingarhola HN-16 sem er CO ₂ niðurdælingarhola Hellisheiðarvirkjunar.	27
Mynd 5.3: Mannvirki niðurdælingarkerfis í Þrengslum. Fremra kúluhús skýlir holu HN-02.	28
Mynd 5.4: Deiliskipulagsuppdrátturinn sýnir lagnabelti með ljós- og dökkbleikum lit. Þau tengja saman borsvæði Carbfix sem sýnd eru innan blárra hringa á mynd.	32
Mynd 5.5: Dæmi um frágang framkvæmdasvæðis og árangur landgræðslu. Fyrir (t.v.) og eftir (t.h.).	36
Mynd 5.6: Dæmi um frágang og aðlögun borstæðis að umhverfi og árangur uppgræðslu. Fyrir (t.v.) og eftir (t.h.).	36
Mynd 5.7: Dæmi um ásýnd framkvæmdasvæðis fyrir (t.v.) og eftir (t.h.) frágang með fræslægju.	37
Mynd 5.8: Verkaskipting Carbfix sem rekstraraðila geymslusvæðis og þriðja aðila. Carbfix tekur við CO ₂ sem fangað er af þriðja aðila við niðurdælingarholu. Rekstraraðili sem hyggur á föngun CO ₂ til niðurdælingar á geymslusvæði Carbfix þarf að ljúka viðeigandi málsmeðferð fyrir sína framkvæmd áður en til samstarfs kemur. CO ₂ fangað úr	

andrúmslofti (B) getur hvort sem er verið sent á gasformi í niðurdælingarholu líkt og sýnt er á mynd eða uppleyst í vatni.	39
Mynd 6.1: Orca, lofthreinsiver Climeworks. Mynd fengin af heimasíðu Climeworks.	41
Mynd 6.2: Skýringarmynd af ferli Orca við föngun CO ₂ úr andrúmslofti og niðurdælingu þess með tækni Carbfix. Mynd fengin af heimasíðu Climeworks.....	42
Mynd 6.3: Mammoth, lofthreinsiver Climeworks. Mynd fengin af heimasíðu Climeworks.	43
Mynd 6.4: Loftsguga Climeworks á lóð tæknigarða við Helliheiðarvirkjun, á tilrauna og þróunar tímabili.	43
Mynd 7.1: Áhrifa- og athugunarsvæði CO ₂ niðurdælingar á geymslusvæði Carbfix á Helliheiði..	50
Mynd 7.2: Fyrirhugað framkvæmdasvæði niðurdælingar CO ₂ á Helliheiði.	52
Mynd 8.1: Yfirlitskort af útvíkkuðu svæði sem tekið er inn í gerð nýs forðafræðilíkans. Upprunalega líkanið frá 2016 er sýnt sem blár ferningur og nýtt útvíkkað líkan frá 2022 sem rauður ferningur. Á myndinni má einnig sjá núverandi holur, holuferla og staðsetningar þversniða (sjá viðauka 3).	56
Mynd 8.2: Þversnið úr uppfærðu jarðfræði- og ummyndunarlíkani fyrir Helliheiði í stefnu NV. Þversniðið sýnir jarðfræði og ummyndun í NV-SA þversniði við Helliheiðarvirkjun (gul stjarna).....	57
Mynd 8.3: Jarðfræðikort sem sýnir áhrifasvæði niðurdælingar á yfirborði og mögulegt áhrifasvæði neðanjarðar, auk lóða Jarðhitagarðs ON. Holutoppar og holuferlar vinnslu- og niðurdælingarhola eru í rauðum og grænum lit. Jarðhiti á yfirborði er sýndur með appelsínugulum punktum. Dökkbrúnir flákar tákna móberg og fjólubláir, bleikir og brúnir eru hraunlög. Svartar, mjóar línur tákna sprungur og misgengi og rauðar línur tákna gossprungur (Mynd úr viðauka 3).	58
Mynd 8.4: Ummyndunarbeltin ásamt dýpi og ummyndunarhita á Helliheiði. Myndin sýnir einnig áætlað dýpi djúpkerfis, millikerfis og grunnvatnskerfis (Mynd úr Snæbjörnsdóttir o.fl., 2018).	59
Mynd 8.5: Yfirlitskort af geymslugeymi og geymslusvæði ásamt núverandi og áætluðum borholum. Útmörk geymslugeymis eru ákvörðuð út frá niðurstöðum mismunandi sviðsmynda úr líkani, sjá umfjöllun um áhrif niðurdælingar CO ₂ á geymslugeyminn 8.4.1 og 8.4.2...	62
Mynd 8.6: Áhrifasvæði niðurdælingar á yfirborði og mögulegt áhrifasvæði neðanjarðar. Myndin sýnir lóðir Jarðhitagarðs, vinnsluholur (rauðar), niðurdælingarholur (grænar), jarðhita á yfirborði (appelsínugulir punktar) og mælipunkta CO ₂ -gasflæðis og hitamælinga (bláir punktar).	63
Mynd 8.7: Þrjár megin niðurdælingarsviðsmyndir forðafræðilíkansins í millikerfi.	65
Mynd 8.8: Samanburður niðurdælingarsviðsmynda 1, 2 og 3 fyrir grunnvatnskerfið (75 m y.s) eftir 30 ár af niðurdælingu í millikerfi með tilliti til hámarks dreifingar CO ₂ hlaðna niðurdælingarvökvans, leysnibindingar og hita- og þrýstingsbreytinga.....	67
Mynd 8.9: Samanburður niðurdælingarsviðsmynda 1, 2 og 3 fyrir millikerfið (380 m u.s) eftir 30 ár af niðurdælingu í millikerfið með tilliti til hámarksdreifingar CO ₂ hlaðna niðurdælingarvökvans, leysnibindingar og hita- og þrýstingsbreytinga.....	69

- Mynd 8.10: Samanburður niðurdælingarsviðsmynda 1, 2 og 3 fyrir djúpkerfið (1000 m u.s) eftir 30 ár af niðurdælingu í millikerfið með tilliti til mestu dreifingar CO₂ hlaðna niðurdælingarvökvans, leysnibindingar og hita- og þrýstingsbreytinga. 71
- Mynd 8.11: Samanburður niðurdælingarsviðsmynda 1, 2 og 3 fyrir grunnvatnskerfið (100 m u.s) eftir 30 ár af niðurdælingu í djúpkerfi með tilliti til hámarksdreifingar CO₂ hlaðna niðurdælingarvökvans, leysnibindingar og hitastigs- og þrýstingsbreytinga. 74
- Mynd 8.12: Samanburður niðurdælingarsviðsmynda 1, 2 og 3 fyrir djúpkerfið (1600 m u.s.) eftir 30 ár af niðurdælingu í djúpkerfi með tilliti til hámarksdreifingar CO₂ hlaðna niðurdælingarvökvans, leysnibindingar og hita- og þrýstingsbreytinga. 77
- Mynd 9.1: Staðsetning vatnsbólsins í Engidal, vatnstökuhola ON ásamt staðsetningu vöktunarhola ON í nágrenni Hellisheiðarvirkjunar þar sem efnasýni eru tekin reglulega til þess að vakta áhrif virkjunarinnar á grunnvatn á svæðinu. Á kortinu er einnig lega vatnsverndarsvæða, staðsetning neyðarlosunar ON fyrir skiljuvatn frá Hellisheiðarvirkjun ásamt núverandi og fyrirhuguðum niðurdælingar- og vöktunarholum Carbfix. Staðsetningar fyrirhugaðra hola eru ekki endanlegar. 83
- Mynd 9.2: Breytileiki í stöðu grunnvatnvatnaskila á svæðinu eins og hún reiknast í grunnvatnslíkani Vatnaskila. Rauða brotalínan sýnir vatnaskilin þegar þau liggja norðarlega (maí 1980) og bláa línan sýnir þegar þau liggja sunnarlega (júlí 1994). Örvar sýna rennslisstefnu grunnvatns miðað við vatnaskil í júlí 1994. Á kortinu er einnig sýnd staðsetning vatnsvinnsluhola ON, staðsetning hola þar sem síritun grunnvatnsborðs fer fram og staðsetning neyðarlosunar fyrir skiljuvatn frá Hellisheiðarvirkjun. Staðsetning á núverandi og fyrirhuguðum niðurdælingar- og vöktunarholum Carbfix er einnig sýnd. Staðsetningar fyrirhugaðra hola eru ekki endanlegar. 84
- Mynd 9.3: Hitaferlar í borholum nærri Þrengslavegamótum (HN-01 og HN-02) og sunnan Lambafells (HK-25 og HK-26). Blár slitinn ferill tákna hitastigul í kalda grunnvatninu efst í staflanum, sá græni í volgu vatnskerfi á 400-800 m og sá hvíti í ummynduðu þakbergi háhitasvæðisins í Hengli (Grímur Björnsson og Hjalti Franzson, 2005). 85
- Mynd 9.4: Staðsetning holu HN-02 í Þrengslum þar sem tilraunaniðurdæling CO₂ fór fram árið 2012 og þar sem niðurdæling á 4000 tonnum/ári af CO₂ frá Orca verkefninu fer fram í dag. Einnig er sýnd staðsetning vöktunarhola í nágrenninu sem efnasýni eru tekin reglulega úr. 89
- Mynd 10.1: Yfirlitsmynd sem sýnir áhrifasvæði niðurdælingar á yfirborði og mögulegt áhrifasvæði neðanjarðar. Jarðskjálftastaðsetningar á tímabilinu 2016-2022 eru sýndar með punktum og eru litakóðaðar eftir dýpi. Myndin sýnir einnig lóðir Jarðhitagarðs, vinnsluholur (rauðar), niðurdælingarholur (grænar) og jarðhita á yfirborði (appelsínugulir punktar) Þríhyrningar sýna jarðskjálftamælistöðvar ON/ÍSOR (appelsínugular), COSEISMIQ (grænar) og VÍ (bláar) (Mynd úr viðauka 3). 94
- Mynd 10.2: Jarðskjálftastaðsetningar á Hengilssvæðinu úr SIL jarðskjálftamælaneti VÍ fyrir árin 1995-2006, þ.e. áður en vinnsla hófst á Hellisheiði. Jarðskjálftar eru litaðir eftir ári og jarðskjálftamælar VÍ eru táknaðir með bláum þríhyrningi. Upplausn jarðskjálftastaðsetninga á þessu tímabili er takmörkuð vegna fárra og fjarlæggra jarðskjálftamæla, en þó sést að jarðskjálftavirkni er mest á norðaustanverðri Hellisheiði, á Bakkasvæðinu í Ölfusi og á N-S misgengjum á milli þessara svæða, en dýptarákvörðunin er ónákvæm (Mynd úr viðauka 3). 96

Mynd 10.3: Nákvæmar jarðskjálftastaðsetningar rúmlega 18.000 yfirfarinna jarðskjálfta á Hengilssvæðinu frá 2016 til 2022. Staðsetningar eru reiknaðar með jarðskjálftastöðvum úr jarðskjálftamælanetum ON/ÍSOR (okt. 2016 - sept. 2018, og sept. 2021 - jún. 2022) og COSEISMIQ (okt. 2018 - ágú. 2022), auk nálægra stöðva úr jarðskjálftamælaneti VÍ. 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. (Mynd viðauka 3).	97
Mynd 10.4: Nærmynd af Hellisheiði (sjá skýringar á mynd 10.3). Útmörk áhrifasvæðis á yfirborði eru skilgreind með blárri línu og jarðskjálftar eru litaðir eftir dýpi. Gular punktalínur sýna áætlaða legu misgengja sem kortlögð voru með þyngdarmælingum. (Mynd úr viðauka 3).....	98
Mynd 12.1: Útdráttur úr aðalskipulagsupprætti Sveitarfélagsins Ölfuss 2020-2036.	109
Mynd 12.3: Deiliskipulag orkuvinnslusvæðis virkjunar á Hellisheiði.....	110
Mynd 12.4: Borsvæði í Þrengslum er innan svæðis N-753 á C-hluta náttúruminjaskrá, sjá bláan hring á mynd.....	112
Mynd 13.1: Umferðarljósakerfi fyrir niðurdælingu á Hellisheiði.	116
Mynd 13.2: Yfirlit yfir fyrirhugaða vöktun niðurdælingar CO ₂ til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði.	118

19 Töfluskrá

Tafla 1.1: Þátttakendur í umhverfismati niðurdælingar CO ₂ á geymslusvæði Hellisheiði.....	6
Tafla 1.2 Sérfræðiskýrslur og höfundar þeirra.....	6
Tafla 2.1: Tímaáætlun umhverfismatsvinnu.....	8
Tafla 5.1: Yfirlit yfir núverandi og fyrirhugaða niðurdælingu á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði.	24
Tafla 5.2: Yfirlit yfir núverandi og nýjar niðurdælingar- og vöktunarholur fyrir CO ₂ á Hellisheiði..	27
Tafla 5.3: Yfirlit yfir nýjar byggingar sem fyrirhugað er að reisa vegna framkvæmdar Carbfix.....	29
Tafla 5.4: Helstu kennistærðir framkvæmdar Carbfix á CO ₂ geymslusvæðinu á Hellisheiði.....	33
Tafla 6.1: Vatnsöflunarkostir sem kemur m.a. til greina að semja við ON um afhendingu á.....	45
Tafla 7.1: Skilgreiningar á vægishugtökum.....	47
Tafla 8.1: Niðurstöður líkanareikninga út frá mismunandi niðurdælingarviðsmyndum fyrir millikerfið. Hámarksstyrkur CO ₂ í vökvafasa, meðalflatarmál og hámarksflatarmál dreifingar niðurdælingarvökvans í millikerfi, hámarksrúmmál bergs áætlað út frá rúmmáli þess bergs sem kemst í snertingu við niðurdælingarvökvann og áætluð geymslugeta.....	72
Tafla 8.2: Niðurstöður líkanareikninga út frá mismunandi niðurdælingarviðsmyndum fyrir djúpkerfið. Hámarksstyrkur CO ₂ í vökvafasa, meðalflatarmál og hámarksflatarmál dreifingar niðurdælingarvökvans í djúpkerfi, hámarksrúmmál bergs áætlað út frá rúmmáli þess bergs sem kemst í snertingu við niðurdælingarvökvann og áætluð geymslugeta.....	78
Tafla 12.1: Samspil framkvæmdar við landnotkun.....	113
Tafla 13.1: Samantekt á mótvægisaðgerðum til að draga úr umhverfisáhrifum niðurdælingar CO ₂	114
Tafla 13.2: Vöktunaráætlun niðurdælingar CO ₂ til geymslu í jörðu á Hellisheiði.....	119
Tafla 14.1: Samantekt á umhverfisáhrifum geymslu CO ₂ á Hellisheiði.....	121

20 Viðaukaskrá

- Viðauki 1: Model of the injection of CO₂ at Hellisheiði. Possible effects of the proposed CO₂ injection and mineral storage operations. Sérfræðiskýrsla Carbfix, 2022.
- Viðauki 2: Grunnvatn á Hellisheiði. Grunnástand og möguleg áhrif fyrirhugaðrar framkvæmdar Carbfix um geymslu CO₂ í jarðlögum á Hellisheiði. Sérfræðiskýrsla Orkuveitu Reykjavíkur, 2022.
- Viðauki 3: Sérfræðiskýrsla fyrir umhverfismat fyrir niðurdælingu CO₂ á Hellisheiði. Grunnástand og hugsanlegar breytingar. ÍSOR, 2022.
- Viðauki 4: Hellisheiði CO₂ injection monitoring plan. Sérfræðiskýrsla Carbfix, 2022.