

20. janúar 2023,

Uppfært 25.02.2025



**Carbfix**

Umsókn um starfsleyfi til geymslu  
Niðurdæling CO<sub>2</sub> á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði  
Viðauki II – Hellisheiði CO<sub>2</sub> vöktunaráætlun geymslusvæðis  
Starfsleyfi UST202301-351

## Inngangur

Fyrirhuguð vöktunaráætlun til niðurdælingar CO<sub>2</sub> í geymslugeymi á Hellisheiði byggir á rannsóknum og rekstrarreynslu Carbfix á svæðinu sl. áratug sem og áhættumati sem fylgir starfsleyfisumsókninni. Vöktunaráætlunin fylgir reglugerð 1430/2022 um geymslu CO<sub>2</sub> í jörðu, lögum um stjórn vatnamála nr. 36/2011 og reglugerðum þar að lútandi, svo sem 796/1999, 797/1999 og 536/2001 auk Vöktunaráætlun Vatnaáætlunar 2022-2027. Hún fylgir jafnframt reglu Orkustofnunar nr. OS-2016-R01-01 um viðbúnað og viðbrögð við jarðskjálftavá vegna losunar á vökva í jörðu um borholur ásamt lögum nr. 96/2023 um viðskiptakerfi ESB með losunarheimildir ásamt aðlútandi reglugerð nr. 606/2021 um viðskiptakerfi Evrópusambandsins með losunarheimildir, en sú reglugerð byggir á reglugerð ESB 2018/2066 um vöktun og upplýsingaskyldu gróðurhúsalofttegunda.

Megintilgangur vöktunaráætlunar er að:

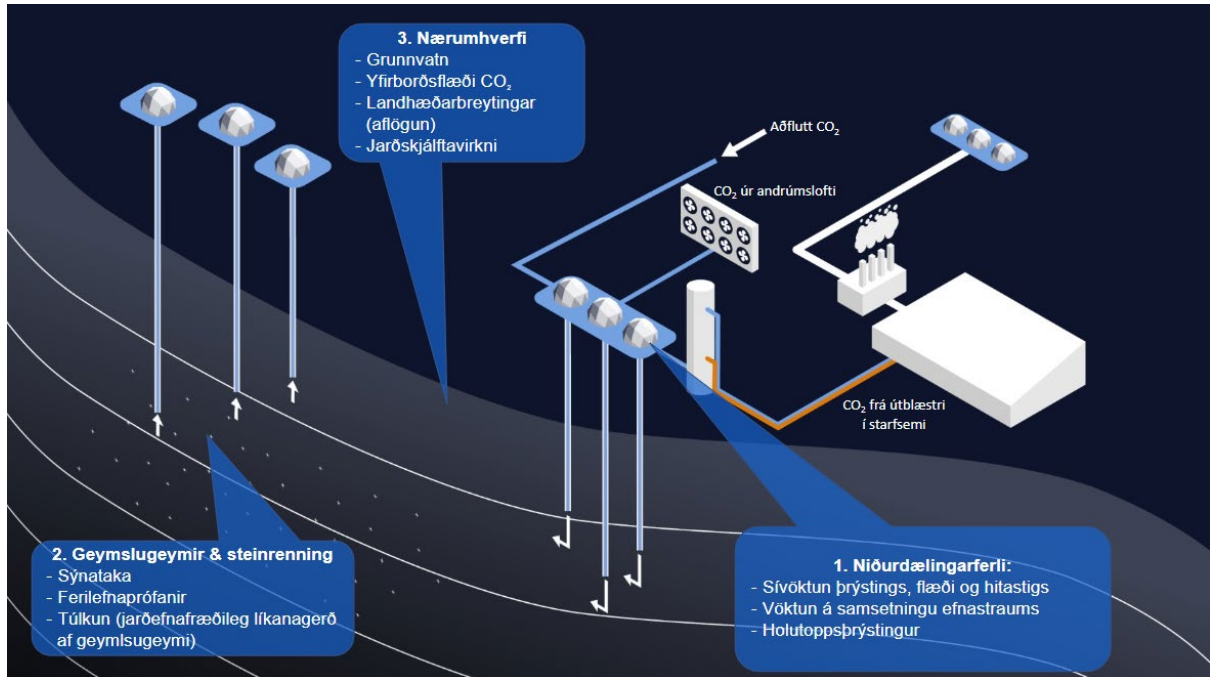
- i) tryggja öruggan og skilvirkan rekstur allra kerfa,
- ii) gera grein fyrir magni CO<sub>2</sub> sem dælt er niður og geymslu þess,
- iii) vakta efnafræðilegt ástand og magnstöðu grunnvatnshlota sem starfsemin getur haft áhrif á, og
- iv) vakta afdrif CO<sub>2</sub> sem dælt er í geymslugeyminn.

Það síðastnefnda (iv) felur einnig í sér steinrenningu CO<sub>2</sub> og þar með varanlega geymslu þess í jarðlögum ásamt því að samræma niðurstöður við líkanareikninga, sannreyna að hvorki leki eða frávik séu til staðar og leggja mat á möguleg áhrif á nærliggjandi umhverfi.

Vöktunaráætlun nær yfir geymslusvæðið og starfsemi þar sem CO<sub>2</sub> fer í niðurdælingarkerfin (þar á meðal niðurdælingarholur) ásamt efna- og eðlisfræðilegum viðbrögðum geymslugeymis við niðurdælingu. Áætlunin tekur einnig til þeirra ferla sem snúa að því að sannreyna steinrenningarferli þess CO<sub>2</sub> sem dælt er niður. Gert er ráð fyrir að vöktunaráætlunin verði uppfærð þegar ástæða þykir til, minnst fimmta hvert ár.

Vöktunaráætlun nær yfir eftirfarandi vöktunarþætti sem einnig eru sýndir á skýringarmynd (Mynd 1) og lýst nánar í eftirfarandi köflum. Allir vöktunarþættir eru teknir saman í Tafla 2. Sýnatökustaðir (borholur, niðurdælingarsvæði, o.s.frv.) og áætluð tíðni mælinga frá 2025 til 2029 eru sýnd í Tafla 3.

- 1) Niðurdælingarferli**
  - a) Sívöktun þrýstings, flæði og hitastigs
  - b) Vöktun á samsetningu efnastraums
  - c) Holutoppþrýstingur
- 2) Geymslugeymir & steinrenning, þar á meðal**
  - a) Sýnataka vatns úr geymslugeymi
  - b) Ferilefnapróf
  - c) Túlkun
- 3) Nærumhverfi, þar á meðal**
  - a) Grunnvatn
  - b) Yfirborðsflæði CO<sub>2</sub>
  - c) Landhæðarbreytingar (aflögun)
  - d) Jarðskjálftavirkni



Mynd 1. Yfirlit yfir fyrirhugaða vöktun vegna niðurdælingar CO<sub>2</sub> til geymslu í jarðlögum á Hellisheiði.

## 1 Niðurdælingarferli

Carbfix beitir tveimur aðferðum við niðurdælingu á CO<sub>2</sub>; annars vegar niðurdælingu á gashlöðnu vatni og hins vegar niðurdælingu á CO<sub>2</sub> á gasformi og vatni í sitt hvorri lögninni í niðurdælingarholu þar sem blöndun og uppleysing CO<sub>2</sub> í vatni á sér stað á ákveðnu dýpi. Í báðum tilfellum nást kjöraðstæður fyrir niðurdælingu CO<sub>2</sub> þar sem niðurdælingarholur eru fóðraðar nógu djúpt til að tryggja að vökvinn streymi ekki út í bergið fyrr en CO<sub>2</sub> er að fullu uppleyst. Eðlisfræðileg gildi gashlaðna vatnsins eða vatnsins og gassins (ef upplausn á sér stað í niðurdælingarholu) sem streymir niður borholuna eru því vöktuð. Gildin eru síðan notuð til að reikna út gasbóluprýsting þ.e.a.s. þrýsting þar sem fyrsta gasbóla myndast við þrýstiléttingu á gashlöðnu vatni. Gasbóluprýstingurinn er reiknaður út með því að nota viðeigandi ástandsjöfnu sem og varmafræðilegar jöfnur, massaflæði vatns og uppleystra gasa, ásamt hitastigi niðurdælingarvatnsins. Þrýstingurinn er síðan borinn saman við þrýstinginn neðst í fóðringu niðurdælingarholunnar sem mældur er við upphaf niðurdælingar. Niðurdælingarkerfin eru hönnuð til að tryggja að gasbóluprýstingur CO<sub>2</sub>-hlaðna niðurdælingarvatnsins sé lægri en vatnsþrýstingur við botn fóðringar með því að viðhalda réttu hlutfalli vatns og CO<sub>2</sub>.

Auk mælinga á gasbóluprýstingi verður sívöktun framkvæmd á þrýstingi, hitastigi og massaflæði gashlaðins vatns við inntak niðurdælingarholu eða gas- og vatnsstraumum fyrir hvert niðurdælingarkerfi með innbyggðum mælum samkvæmt iðnaðarstöðlum. Einnig fer fram vöktun á efnasamsetningu vatns og CO<sub>2</sub> sem dælt er niður. Sýnataka og greining á efnasamsetningu niðurdælingarstrauma (Tafla 1) verður framkvæmd árlega í hið minnsta fyrir öll niðurdælingarkerfi í rekstri, sjá nánar í Tafla 3.

Tafla 1: Samantekt á mismunandi efnabreytum vatns- og gassýna ásamt greiningaraðferð.

Gassýni úr niðurdælingarstraumi (í þeim tilfellum þar sem uppleysing CO <sub>2</sub> á sér stað í niðurdælingarholu)	
<b>Breytistærð</b>	<b>Dæmi um greiningaraðferð</b>
CO <sub>2</sub> , O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub>	Gasgreinir (GC)
Vatnssýni (Niðurdælingarvatn, vatn úr geymslugeymi og grunnvatn) <sup>a</sup>	
<b>Breytistærð</b>	<b>Dæmi um greiningaraðferð</b>
Sýrustig (pH)	Rafskaut, á sýnatökustað
Hitastig	Hitamæling á sýnatökustað
Rafleiðni	Rafskaut, á sýnatökustað
Katjónir (Si, Al, Na, K, Fe, Mg, Ca, B, As, Ba, Cd, Co, Cr, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, V, Zn)	Rafgasgreinir (ICP-OES)
Anjónir (klóríð, sulfat, flúoríð)	Jónaskilja (IC)
Uppleyst ólífrænt kolefni	Títrun
<i>Aðeins í Húsmúla (djúpkerfi):</i>	
Vökvi - H <sub>2</sub> S	Títrun (á sýnatökustað fyrir vökva úr geymslugeymi)
Gufa – CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S	Títrun
Gufa – O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , H <sub>2</sub>	Gasgreinir (GC)
<i>Aðeins í Jarðhitagarði (Mammoth):</i>	
Ammóníum	Síflæðisgreining (CFA), litrófsmælingar
Nítrat	Jónaskilja (IC)
Heildarmagn lífræns kolefnis (TOC)	TOC greinir

<sup>a</sup>Sjá Viðauka A fyrir val á efnabreytum.

CO<sub>2</sub> gasskynjara (og H<sub>2</sub>S á niðurdælingarsvæði í Húsmúla) verður komið fyrir inni í veðurskýli sem byggð eru yfir niðurdælingarholur. Auk þess að tryggja öryggi, gera gasskynjarar kleift að tryggja að enginn CO<sub>2</sub> leki sé frá niðurdælingarkerfinu. Mánaðarlega verður jafnframt framkvæmd sjónræn skoðun á niðurdælingarsvæði sem fyrirbyggjandi aðgerð til að greina frávik.

Carbfix gerir ekki ráð fyrir losun frá starfstöðinni á Hellisheiði í daglegum rekstri. Verði vart við frávik í rekstri verður losunin áætluð í samræmi við b. lið 2. mgr. 23. greinar reglugerðar ESB 2018/2066 um vöktun og upplýsingaskyldu gróðurhúsalofttegunda. Má þá gera ráð fyrir að losunin sé annað hvort ófyrirséð (e. *Fugitive emissions*) eða fyrirséð (e. *Vented emissions*). Ófyrirséð losun getur stafað af bilunum í niðurdælingarkerfi á meðan fyrirséð losun getur t.d. stafað af viðhaldi. Í slíkum tilfellum verður magn þess CO<sub>2</sub> sem losað er metið. Losunina má sem dæmi reikna út frá rúmmáli rýmisins (lagnir, holutoppar, borholur o.s.frv.) ásamt þrýstingi, hitastigi og efnasamsetningu vatnsins fyrir losun.

## 2 Geymslugeymir og steinrenning

Eftirlit með tilvist, staðsetningu og flæðisleiðum CO<sub>2</sub>-hlaðins vatns í geymslugeyminum, ásamt steinrenningarferlinu, verður framkvæmt með jarðefnafræðilegum aðferðum. Þótt vöktun á flæðileiðum um geymslugeyminn og efnafræði sviði til aðferða til vöktunar grunnvatns og jarðhita, hafa nýstárlegar aðferðir til vöktunar á steinrenningu CO<sub>2</sub> í jarðlögum rutt sér til rúms og verið í stöðugri þróun frá stofnun Carbfix, þar með talið á Hellisheiði þar sem niðurdæling á CO<sub>2</sub> stendur yfir<sup>1,2,3</sup>.

### 2.1 Greining vatns úr geymslugeymi

Yfirgripsmikil vatnssýnataka úr vöktunarholum geymslugeymis á geymslusvæðinu gefur mikilvægar upplýsingar um samspil CO<sub>2</sub>, vatns og basalts neðanjarðar.

Grunnástand efnasamsetningar vökva úr geymslugeymi verður metið áður en dælt verður í nýjar niðurdælingarholur með því að taka sýni úr viðeigandi vöktunarholum og efnagreina. Vöktunarholur eru þær holur í grennd við niðurdælingarholur sem líklegar eru að fái greinanlegt magn af niðurdælingarvökva og eru ákvarðaðar hverju sinni út frá fyrirbyggjandi gögnum og forðafræðilikönun<sup>4</sup>. Vöktunarholur eru nýttar til vöktunar á þeim ferlum sem eiga sér stað í geymslugeyminum. Vöktun verður fínstillt frekar á meðan niðurdælingu stendur með notkun ferilefnaprófa (kafli 2.2). Fylgst verður með vöktunarholum á meðan niðurdælingu stendur en til að byrja með er tíðni mælinga hærrí en minnkar síðan þegar borin hafa verið kennsl á viðbragð hvernar vöktunarholu við niðurdælingu. Þar sem efnasamsetning vökva úr geymslugeymi hefur áhrif á túlkun niðurstaðna ferilefnaprófa (kafli 2.2), verður mikil fylgni milli sýnatöku úr vöktunarholum og framkvæmd ferilefnaprófa.

Þær efnabreytur sem greindar verða í vatni geymslugeymisins eru teknar saman í Tafla 1. Staðsetning vöktunarhola og tíðni mælinga (ásamt útskýringum) fyrir tímabilið 2025-2029 má finna í Tafla 3 og Mynd 3. Tafla 3 tilgreinir einnig mælingar á þrýstingi geymslugeymisins í gegnum vatnshæðamælingar eða þrýstimælingar í borholum.

### 2.2 Ferilefnapróf

Ferilefnapróf eru veigamikill þáttur í vöktunaráætluninni þar sem upplýsingar um dreifingu og styrk ferilefna þjóna margþættum tilgangi:

- 1) Fyrir kortlagningu rennisleiða vatns í jarðlögum á geymslusvæði,
- 2) Fyrir mat á flæðishraða, og
- 3) Fyrir mat á blöndunarhlutfalli niðurdælingarvökvans í vöktunarholum.

<sup>1</sup> 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. de la R., Hall J., Dideriksen K. and Broecker W. S. (2016) Rapid carbon mineralization for permanent disposal of anthropogenic carbon dioxide emissions. *Science* 352, 1312–1314.

<sup>2</sup> Gunnarsson I., Aradóttir E. S., Oelkers E. H., Clark D. E., Arnarson M. Þ., Sigfússon B., Snæbjörnsdóttir S. Ó., Matter J. M., Stute M., Júlíusson B. M. and Gíslason S. R. (2018) The rapid and cost-effective capture and subsurface mineral storage of carbon and sulfur at the CarbFix2 site. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 79, 117–126.

<sup>3</sup> Clark D. E., Oelkers E. H., Gunnarsson I., Sigfússon B., Snæbjörnsdóttir S. Ó., Aradóttir E. S. and Gíslason S. R. (2020) CarbFix2: CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S mineralization during 3.5 years of Síritun injection into basaltic rocks at more than 250 °C. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 279, 45–66.

<sup>4</sup> Carbfix hf. (2022) Storage Permit Application, CO<sub>2</sub> injection and storage at Carbfix's storage site at Hellisheiði. Annex I – Characterization and assessment of the potential storage complex.

Niðurstöður úr ferilefnaprófum ásamt upplýsingum um efnasamsetningu vökva geymslugeymisins nýtast til að meta umfang steinrenningar CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S í geymslugeyminum, m.a. með því að nota massajafnvægisútreikninga sem og forðafræðilíkon.

Eftir að niðurdæling hefst í nýjan hluta geymslugeymisins eru ferilefnapróf framkvæmd í þessum tilgangi. Ferilefninu verður dælt niður í einum skammti og sýnum safnað úr vöktunarholum. Tíðni sýnatöku er hærrí í upphafi en minnkar þegar borið hefur verið kennsl á viðbragð hvernar vöktunarholu við niðurdælingu, líkt og greint er frá fyrir tímabilið 2025-2029 í Tafla 3.

Ferilefnapróf geta jafnframt hjálpað til við að greina eða fínstilla sýnatökuáætlun fyrir einstaka borholur, þ.e. umfang sýnatökusvæðis (sjá hér að ofan). Ef tími leyfir er því hægt að framkvæma fyrsta ferilefnaprófið áður en niðurdæling hefst til að draga úr fjölda efnasýna úr vökva geymslugeymis síðar meir.

### 2.3 Túlkanir

Hægt er gera efnavarmafræðilega útreikninga á niðurstöðum efnagreininga á sýnum úr vöktunarholum til að ákvarða hvort vatn úr vöktunarholum sé mettað eða yfirmettað m.t.t ákveðinna steinda á borð við karbónatsteindir. Þetta gefur t.a.m. vísbendingar um hvort aðstæður séu hagstæðar fyrir steinrenningu CO<sub>2</sub>. Hægt er að vakta þessar breytur til að fylgjast með mögulegum breytingum í geymslugeymi með tíma. Slíkir jarðefnafræðilegir útreikningar á efnasamsetningu vökva úr geymslugeymi ásamt niðurstöðum úr ferilefnaprófum eru grundvallarupplýsingar í gerð forðafræðilíkana<sup>4</sup> og við massajafnvægisútreikninga.

Massajafnvægisútreikningar geta gefið mat á hlutfalli CO<sub>2</sub> og H<sub>2</sub>S sem steinrennist í rennislíðum milli niðurdælingarhola og þeirra vöktunarhola sem fá umtalsvert magn af niðurdælingarvökva og gefur gróft mat á flæðishraða og hraða steinrenningar fyrir þessar tilteknu holustaðsetningar. Þessar niðurstöður eru svo túlkaðar nánar í þrívíðu forðafræðilíkani af svæðinu<sup>4</sup> og nýttar til að leggja mat á heildarsteinrenningu geymslugeymisins á meðan rekstri stendur og yfir lengri tíma.

Byggt á þessum jarðefnafræðilegu túlkunum verða niðurstöðurnar bornar saman við spár úr forðafræðilíkönunum<sup>4</sup>. Líkanið verður kvarðað byggt á þeim vöktunargögnum sem fjallað er um hér að ofan og það útvíkkað eftir þörfum. Þar sem þörf krefur, verða frekari gögnum safnað í þessu skyni og/eða áhættumat og vöktunaráætlun uppfærð.

## 3 Nærumhverfi

### 3.1 Grunnvatn

Lögð er áhersla á öflugt eftirlit til að fylgjast með hugsanlegum áhrifum niðurdælingar CO<sub>2</sub> á nærliggjandi umhverfi, þar með talið grunnvatn. Í þessu skjali beinist grunnvatnsvöktun að köldu grunnvatni á minna en 300 m dýpi, en vöktun á dýpri grunnvatnshlotum í milli- og djúpkerfum er lýst í kafla 2.1.

Efnafraði vatns í völdum grunnvatnsvöktunarholum nálægt niðurdælingarholum og geymslugeymi verður greind með tilliti til þeirra efnabreyta sem taldar eru upp í Tafla 1 til að meta ástand grunnvatnsins. Vöktun á magnbundnu ástandi grunnvatnsins verður framkvæmd með vatnsyfirborðsmælum eða -ritum í sömu grunnvatnsvöktunarholum. Staðsetning vöktunarhola grunnvatns og áætluð tíðni sýnatöku (auk útskýringa) fyrir tímabilið 2025-2029 er sýnd í Tafla 3. Þar á meðal eru árlegar sýnatökur og greining á efnafraði neysluvatns úr Engidalsholum (HU- 1 til HU-9) sem staðsettar eru nálægt geymslusvæðinu/lóðinni sem þegar er hluti af starfsleyfi Hellisheiðarvirkjunar. Ef um nýjar niðurdælingarholur er að ræða verður þetta eftirlit víkkað eftir þörfum á grundvelli upplýsinga úr fyrstu ferilefnaprófunum (kafla 2.2).

### 3.2 Yfirborðsflæði CO<sub>2</sub>

Reglulegar mælingar á yfirborðsflæði CO<sub>2</sub> um jarðveg verða framkvæmdar samhliða sjónrænni skoðun á niðurdælingarkerfum og -svæðum. Megintilgangur þessara mælinga er að ganga úr skugga um að niðurdælingarkerfin séu starfrækt samkvæmt áætlun (sjá kafla 1)) og að greina frávik á flæði CO<sub>2</sub> um jarðveg.

Mælingar á yfirborðsflæði CO<sub>2</sub> eru gerðar með því að nota lokuð mælingarhólf þar sem styrkur CO<sub>2</sub> í hólfinu er mældur sem fall af tíma. Þessar mælingar verða framkvæmdar annað hvert ár í grennd við niðurdælingarholur til að fylgjast með mögulegum breytingum á flæði CO<sub>2</sub> um jarðveg og bera kennsl á mögulegar CO<sub>2</sub>-lekaleiðir frá niðurdælingarkerfi eða úr geymslugeymi umfram náttúrulegan bakgrunn á svæðinu.

Reglulegar gasflæðimælingar hafa verið gerðar á Hellisheiði síðan 2008. Nánari upplýsingar um flæðimælingar um yfirborð má finna í kafla 6 í sérfræðiskýrslu ÍSOR fyrir mat á umhverfisáhrifum, m.a. mynd 16 sem sýnir umfang fyrri mælinga.

### 3.3 Yfirborðsbreytingar

Gervihnattagögn (InSAR) verða notuð til að meta mögulegar landhæðarbreytingar á geymslusvæðinu. Gögnin gera framkvæmdaraðila kleift að fylgjast með hvers kyns áhrifum niðurdælingar, bæði í millikerfi og djúpkerfi, á yfirborð landsins og umfang þeirra. Gervihnattagögnin verða endurskoðuð á fimm ára fresti, en sá tímarammi gerir greiningu á mælanlegum breytingum mögulega.

### 3.4 Jarðskjálftavirkni

ÍSOR vann frummat á jarðskjálftahættu geymslusvæðisins sem hluta af mati á umhverfisáhrifum vegna niðurdælingar CO<sub>2</sub> á geymslusvæði Carbfix á Hellisheiði. Matið var framkvæmt með hliðsjón af reglum Orkustofnunar um viðbúnað og viðbrögð við jarðskjálftavá vegna losunar á vökva í jörðu um borholur nr. OS-2016-R01-01.

Framkvæmd vöktunar á jarðskjálftavirkni vegna niðurdælingar CO<sub>2</sub> felur í sér innleiðingu verkferla þar sem fyrirbyggjandi skref eru tekin, m.a. með því að stýra hraða flæðis í niðurdælingarholur, sér í lagi við upp- og niðurkeyrslu kerfisins, sjá Mynd 2. Svokallað umferðaljósakerfi verður innleitt og prófað á meðan gangsetningu niðurdælingarkerfis stendur, en kerfið býður uppá nánast rauntíma viðbragð milli jarðskálftaefirlits og rekstur niðurdælingarkerfa. Umferðarljósakerfi fyrir vöktun á jarðskjálftavirkni vegna niðurdælingar er sannreynd aðferð<sup>5</sup> og hefur verið í notkun á Hellisheiði frá 2012 fyrir niðurdælingu á skiljuvatni frá Hellisheiðarvirkjun<sup>6,7</sup>. Staðbundið skjálftanet verður endurskoðað áður en niðurdæling er aukin og umferðarljósakerfið verður endurskoðað árlega á meðan starfsemi stendur.

Sjá nánar um jarðskjálftavirkni og vöktun í kafla 7 til 9 í sérfræðiskýrslu ÍSOR fyrir mat á umhverfisáhrifum.

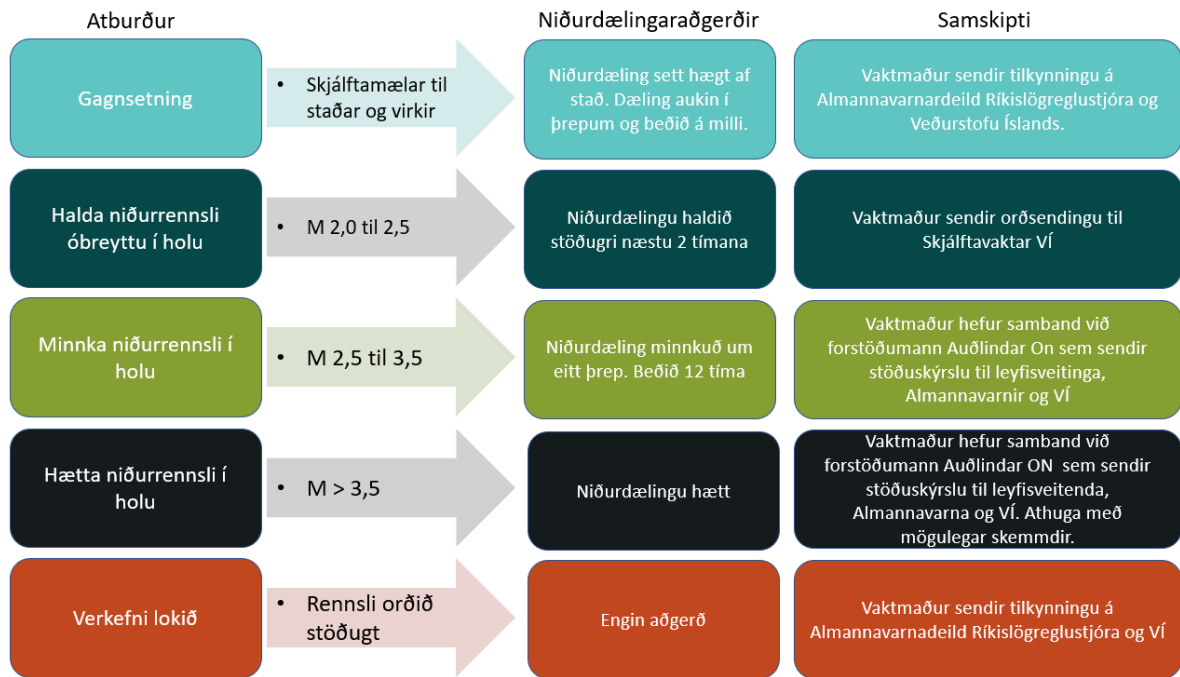
---

<sup>5</sup> AltaRock Energy, Inc., 2011.

<sup>6</sup> Thorsteinsson, H. & Gunnarsson, G. (2014). Induced Seismicity—Stakeholder Engagement in Iceland. GRC Transactions.

<sup>7</sup> Hjörleifsdóttir V., Ingvarsson G., Ratouis T., Gunnarsson G., Snæbjörnsdóttir S. O. and Sigfússon B. (2021) Ten years of induced earthquakes in the Húsmúli CO<sub>2</sub> injection site, Hellisheiði, Iceland. In Sixth International Conference on Engineering Geophysics, Virtual, 25-28 October 2021 SEG Global Meeting Abstracts. Society of Exploration Geophysicists. pp. 96–100.





Mynd 2. Umferðarljósakerfi fyrir niðurdælingu á Hellisheiði. Umferðaljósið byggir á því að ákveðnar verkferlar sem á myndinni eru merktir sem „niðurdælingaraðgerðir“ og „samskipti“ fara í gang þegar vart er við jarðskjálftavirkni af ákveðnum styrk.

## 4 Vöktun eftir lokun geymslusvæðis

Fyrirhuguð bráðabirgðaáætlun vegna tímabils eftir lokun felur í sér vöktun á viðeigandi þáttum með minnkandi sýnatöku og/eða tíðni mælinga sem verða uppfærð eftir þörfum fyrir lokun svæðisins. Vöktun eftir lokun skal ekki vera skemmri en 20 ár, nema hægt sé að sýna fram á að öll fyrirliggjandi gögn bendi til þess að CO<sub>2</sub> muni bindast varanlega með leysnibindingu og steinrenningu.

Þetta felur í sér áframhaldandi vöktun á steinrenningu, geymslugeymi og grunnvatnshlotum ásamt yfirborðsgasflæðimælingum, þar sem sýnatöku og/eða tíðni mælinga minnkar í samræmi við það sem er sýnt í Tafla 2 hér að neðan. Jafnframt verður framkvæmdur álestur á holutoppþrýstingi, vatnsborð og hitastig mælt í aflögðum niðurdælingarholum. Ef þrýstingshækkun mælist veruleg verða einnig tekin vatns- og gassýni úr niðurdælingarholum og þau efnagreind og hitastig mælt.

## 5 Vöktunaráætlun og samantekt mælingaáætlunar 2025-2029

Tafla 2 tekur saman vöktunaráætlunina sem er lýst í köflunum hér að ofan og sýnir þá vöktunarpætti sem vakta skal á hverri staðsetningu ásamt tíðni mælinga áður en niðurdæling hefst, meðan á henni stendur og eftir lokun geymslusvæðis í samræmi við lokunaráætlun.

Tafla 3 sýnir áætlaða tíðni mælinga frá 2025-2029 fyrir einstaka staði (borholur, niðurdælingarsvæði, o.fl. – sjá Mynd 3). Fjöldi mælinga getur verið lægri/hægri eða færst milli ára ef tafir verða á framkvæmdum nýrra niðurdælingarsvæða eða skölun þeirra, vegna óvæntra breytinga á niðurdælingarstarfsemi eða starfsemi jarðvarmavirkjunarinnar sem hefur áhrif á vöktunina. Jafnframt eru ferilefnasýni úr vöktunarholum háð flæðihraða vatns í geymslugeyminum sem ferilefnaprófanirnar taka til. Af þeim sökum er tímasetning og magn sýnatöku ferilefnaprófa stillt á meðan mælingar standa yfir og sýnataka grunnvatns og vatns úr geymslugeyminum breytileg eftir niðurstöðum ferilefnaprófa (sjá kafla 2 og <sup>4</sup>).

Tafla 2: Yfirlit yfir vöktunaráætlun fyrir Carbfix niðurdælingu á Hellisheiði.

	Vöktunarpáttur		Greiningar-/mælingaraðferð	Staðsetning	Tíðni (árlega) <sup>a</sup>			
					Fyrir gangsetningu	Á meðan niðurdælingu stendur	Eftir lokun <sup>e</sup>	
<b>Niðurdælingarkerfi</b>	Þrýstingur	Af öllum flæðisraumum í niðurdælingarholu	Þrýstimælir	Niðurdælingarholutoppar /-kerfa		Síritun		
	Hitastig		Hitamælir			Síritun		
	Flæði		Flæðimælir			Síritun		
	Efnasamsetning niðurdælingavatns			Sýnataka & greining á rannsóknarstofu	Niðurdælingarkerfi	Árlega til 4, háð uppruna CO <sub>2</sub>		
	CO <sub>2</sub> gasstyrkur í andrúmslofti (og H <sub>2</sub> S þar sem á við)			Gasmælir	Veðurskýli yfir niðurdælingarholur		Síritun	
	Sjónræn skoðun (tæring, lekar, óreglur)			Sjónrænt, gasmælir	Niðurdælingarsvæði		12	
	Þrýstingur geymslugemismis			Vatnsborðsmælir eða þrýstimælir	Niðurdælingarholur	1	Síritun af borholu þrýstingi og hitastigi (sjá að ofan)	1-1/5 <sup>c</sup>
	Hitastig grunnvatns við vatnsyfirborð			Hitamælir		1		1-1/5 <sup>c</sup>
<b>Geymslugemir &amp; steinrenning</b>	Efnasamsetning vökva í geymslugemir og hitastig		Sýnataka & greining á rannsóknarstofu	Vöktunarholur	Grunnástand	Há → lág tíðni <sup>b</sup>	1-1/5 <sup>c</sup>	
	Þrýstingur geymslugemismis		Vatnsborðsmælir eða þrýstimælir	Vöktunarholur	1	Árlega to ½		
<b>Nærliggjandi umhverfi</b>	Efnasamsetning grunnvatns		Sýnataka & greining á rannsóknarstofu	Valdar grunnar borholur	Grunnástand	Árlega to ½	1/2-1/5 <sup>c</sup>	
	Grunnvatns yfirborð		Vatnsborðsmælir eða þrýstimælir		Grunnástand	Árlega to ½		
	CO <sub>2</sub> yfirborðsflæði		Yfirborðsgasflæðimælir	Niðurdælingarsvæði	1	½	1/4 <sup>d</sup>	
	Jarðskjálftavirkni		Staðbundnar og svæðisbundnar jarðskjálftastöðvar	Geymslusvæði	Síritun			
	Landhæðabreytingar		Gervihnattamyndir (InSAR)		Gangatúlkun á 5 árafresti			

<sup>a</sup> Fjöldi sýna/mælinga/athuganna hvert starfsár

<sup>b</sup> Hærri tíðni sýnatöku í upphafi þar sem viðbrögð geymslugemismis/grunnvatns eru óþekkt og lægri tíðni þar sem viðbrögð hafa verið áður rannsökuð eða þekkt. Áætlun fyrir hverja borholu er að finna í Töflunni hér að neðan fyrir næstu ár.

<sup>c</sup> 1-1/5: Árlega í þrjú ár, svo fimmta hvert ár; 1/2-1/5: Annað hvert ár fyrstu þrjú árin, svo fimmta hvert ár.

<sup>d</sup> Fjórða hvert (1/4) eða annað hvert (1/2) ár

<sup>e</sup> Vöktun eftir lokun skal ekki vera undir 20 árum, nema hægt sé að sýna fram á það fyrr með gögnum CO<sub>2</sub> sé eða muni bindast varanlega með leysnibinding og steinrenningu.

Tafla 3: Útvíkkuð vöktunaráætlun með staðsetningu mælinga og/eða sýnatöku ásamt tíðni frá 2025 til 2029 fyrir starfsemi Carbfix á Helliheiði. Litur dálka sýnir mikilvægi vöktunarpátta fyrir mismunandi niðurdælingarsvæði í Húsmúla (djúpkerfi), Orca (Þrengsli), Mammoth (Jarðhitagarður), Þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni (Jarðhitagarður)<sup>f</sup>, eða **allt geymslusvæðið**

	Vöktunarpáttur		Greiningar-/mælingaraðferð	Staðsetning	Tíðni (áætluð) <sup>a</sup>					Athugasemd	
					2025	2026	2027	2028	2029		
Niðurdæling	Þrýstingur	Af öllum flæðistraumum sem fara ofan í niðurdælingarholu	Þrýstimælir	Niðurdælingarholutoppar/kerfi							
	Hitastig		Hitamælir								
	Flæði		Flæðimælir								
					HN-14	Síritun					
					HN-16	Síritun					
					HN-02	Síritun					
				CHI-01	Síritun						
				CHI-02	Síritun						
				CHI-03 <sup>f</sup>							
	Efnasamsetning niðurdælingarstrauma	Sýnataka & greining á rannsóknarstofu		Niðurdælingarkerfi							
				Húsmúli - Uppleyst gas	4	4	4	4	4		
				Húsmúli - Þéttvatn	1	1	1	1	1		
				Húsmúli - Skiljuvatn	1	1	1	1	1		
				Orca (Þrengsli) - Gas	2	2	2	2	2	Lág tíðni vegna stöðugs CO <sub>2</sub> gas straums	
				Orca (Þrengsli) - Vatn	1	1	1	1	1		
				Mammoth (Jarðhitagarður) - Uppleyst gas	Síritun						
				Mammoth (Jarðhitagarður) - Vatn	4	4	2	2	2	Tíðni lækkar þegar búið er að skilgreina breytileika	
				Þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni (Jarðhitagarður) - Gas <sup>f</sup>							
				Þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni (Jarðhitagarður) - Vatn <sup>f</sup>							
	Styrkur CO <sub>2</sub> í andrúmslofti	Gasmælir		Veðurskýli							
				HN-14	Síritun					Hefst 2025. Styrkur H <sub>2</sub> S einnig mældur vegna niðurdælingar á H <sub>2</sub> S gasi.	
				HN-16	Síritun					Hefst 2025. Styrkur H <sub>2</sub> S einnig mældur vegna niðurdælingar á H <sub>2</sub> S gasi.	
				HN-02	Síritun						
				CHI-01	Síritun						
				CHI-02	Síritun						
				CHI-03 <sup>f</sup>							
	Sjónræn skoðun (lekar, óreglur)	Sjónrænt, gasmælir		Niðurdælingarsvæði							
				Húsmúli	12	12	12	12	12		
			Orca (Þrengsli)	12	12	12	12	12			
			Mammoth (Jarðhitagarður)	12	12	12	12	12			
			Þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni (Jarðhitagarður) <sup>f</sup>								
Þrýstingur geymslugeymis	Vatnsborðsmælir eða þrýstimælir		Niðurdælingarholur								
Hitastig grunnvatns við vatnsborð	Hitamælir										
			HN-14	Síritun af borholu þrýstingi og hitastigi (sjá að ofan)							
			HN-16								
			HN-02								
			CHI-01								
			CHI-02								
			CHI-03 <sup>f</sup>								
Losun CO <sub>2</sub>	Háð einstaka losunum		Niðurdælingarsvæði								
			Húsmúli	Eins og þörf krefur - Engin skipulögð losun plönuð					Ekki er gert ráð fyrir að þurfi að losa CO <sub>2</sub> , en minniháttar losun getur átt sér stað vegna viðhalds eða annarra inngripa í tengslum við niðurdælingarkerfið. Í þeim tilfellum verður losun CO <sub>2</sub> reiknuð. T.d. má reikna losunina út frá rúmmáli rýmisins (lagnir, holutoppar, borholur o.s.frv.) ásamt þrýstingi, hitastigi og efnasamsetningu vatnsins fyrir losun.		
			Orca (Þrengsli)								
			Mammoth (Jarðhitagarður)								
			Þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni (Jarðhitagarður) <sup>f</sup>								

Tafla 3 (framhald).

	Vöktunarpáttur	Greiningar-/mælingaraðferð	Staðsetning	Tíðni (áætluð) <sup>a</sup>					Athugasemd	
				2025	2026	2027	2028	2029		
<b>Geymslugeymir &amp; steinrenning</b>	Efnasamsetning vökva í geymslugeymi og hitastig	Sýnataka & greining á rannsóknarstofu	Vöktunarhola							
			HE-31 Heildarefnagreining	6	4	2	1	1	Viðbrögð þekkt því vöktun hefur farið fram síðan 2014 <sup>8</sup> . Tímabundin aukning í ferilefnasýnatöku í 2025 vegna ferilefnaprófa. Tímabundin aukning í vatnsýnatöku úr geymslugeyminum frá 2025 vegna útvíkkaðrar starfsemi í tengslum við Silverstone verkefnið.	
			Ferilefnasýni	9	6	2				
			HE-48 Heildarefnagreining	6	2	2	1	1		
			Ferilefnasýni	9	6	2				
			HE-44 Heildarefnagreining	6	4	2	1	1		
			Ferilefnasýni	9	6	6	2		Viðbrögð þekkt því vöktun hefur farið fram síðan 2012 <sup>9</sup> .	
			HN-04 Heildarefnagreining	2	2	2	2	2		
			Ferilefnasýni						Viðbrögð þekkt því vöktun hefur farið fram síðan 2012 <sup>9</sup> .	
			HK-34 Heildarefnagreining	1	1	1	1	1		
			Ferilefnasýni	1	1	1	1	1	Breytileiki þekktur frá starfsemi Hellisheiðavirkjunar <sup>10</sup> . Sýnatökustaðir eru langt frá niðurdælingarsvæði svo einhver viðbrögð kerfanna munu mælast talvert seinna en í HK-34.	
			HK-31 Heildarefnagreining	1		1		1		
			Ferilefnasýni	1		1		1		
			HK-26 Heildarefnagreining	1		1		1		
			Ferilefnasýni	1		1		1		
			HK-25 Heildarefnagreining	1		1		1		
			Ferilefnasýni	1		1		1	Lægri tíðni eftir að grunnástand hefur verið ákvarðað og viðbrögð greind.	
			CHM-01 Heildarefnagreining	6	4	4	2	2		
			Ferilefnasýni	6	6	6				
			CHM-02 <sup>f</sup> Heildarefnagreining							
		Ferilefnasýni								
	Þrýstingur geymslugeymis	Vatnsborðsmælir eða þrýstímælir	Vöktunarholur							
			HE-31, HE-48, HE-44						Ekki viðeigandi, tveggja fasa jarðhitavinnsluholur	
			HN-04	1	1	1	1	1		
			HK-34	1	1	1	1	1		
			HK-31	1		1		1		
			HK-26	1		1		1		Staðsetning er langt frá niðurdælingarsvæði svo hugsanleg viðbrögð kerfanna munu mælast talvert seinna en í HK-34.
			HK-25	1		1		1		
			CHM-01	1	1	1	1	1		
			CHM-02 <sup>f</sup>							
<b>Nærumhverfi</b>	Efnasamsetning grunnvatns	Sýnataka & greining á rannsóknarstofu	Valdar grunnar borholur							
	Vatnsborð	Vatnsborðsmælir								
			KH-52	3	2	1	1	1	Breytileiki þekktur frá starfsemi Hellisheiðavirkjunar. Lægri tíðni eftir að viðbrögð geymslugeymis við niðurdælingu hafa verið rannsökuð. Lægri tíðni í HK-14 því hún er staðsett í lengri fjarlægð frá niðurdælingarsvæðinu svo viðbrögð kerfanna mun mælast talvert seinna en í öðrum borholum. Borholur HU-01 til HU-09 í Engidal eru notaðar til framleiðslu á drykkjarvatni og því fer sýnataka fram þar árlega. Þetta táknar blöndu af vatni frá einstökum borholum sem eru í rekstri núna.	
			KH-06	3	2	1	1	1		
			HK-14	2	1		1			
			HU-1 til HU-9 (valdar)	1	1	1	1	1		
	Yfirborðsflæði CO <sub>2</sub>	Yfirborðsgasflæðimælir	Niðurdælingarsvæði							
			Húsmúli		1		1			
			Orca (þrengsli)	1		1		1		
			Mammoth (Jarðhitagarður)		1		1			
		Þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni (Jarðhitagarður) <sup>f</sup>								
Jarðskjálftavirkni	Staðbundnar og svæðisbundnar jarðskjálftastöðvar	Niðurdælingarsvæði	Síritun							
Landhæðarbreytingar	Gervihnattamyndir (InSAR)					1		Sjálfvirk gagnasöfnun á gervihnattagögnum sem túlkuð eru fimmta hvert ár		

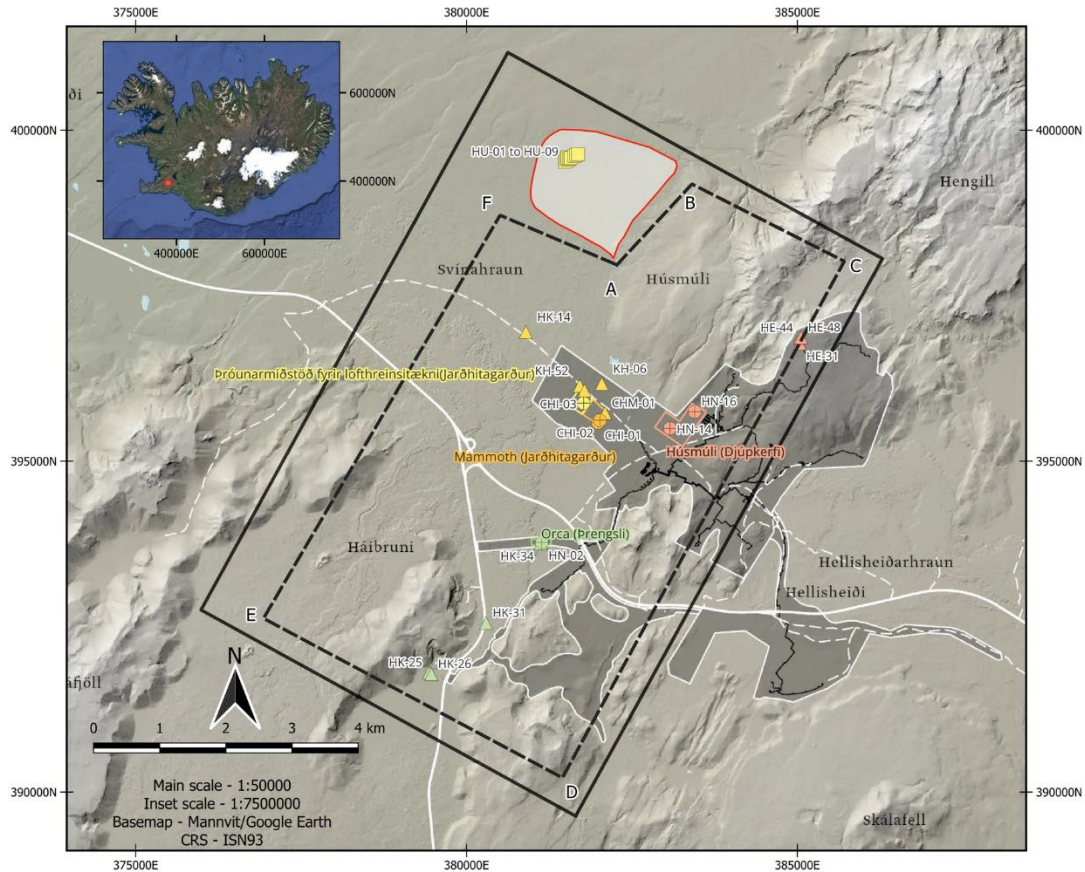
<sup>a</sup> Áætlaður fjöldi sýna/mælinga/kannana ár hvert á meðan rekstri stendur. Raunveruleg tíðni mælingar getur verið hærri/lægri eða hliðrað milli ára í tilvikum þar sem seinkun verður á upphafi starfsemi á nýjum niðurdælingarsvæðum, stækkun þeirra eða aðrar óviðráðanlegar breytingar tengdar niðurdælingu eða starfsemi Hellisheiðavirkjunar sem gætu haft áhrif á vöktunina. Þar að auki er ferilefnasýnataka háð flæðishraða vatns neðanjarðar þar sem ferilefnaprófin eru framkvæmd. Þess vegna er tímasetning og fjöldi sýna aðlöguð á meðan á ferilefnaprófi stendur, vatnsýnataka úr geymslugeyminum og á grunnvatni eru svo aðlöguð í samræmi við niðurstöður.

<sup>f</sup> Þróunarmiðstöð fyrir lofthreinsitækni, ekki til staðar í augnablikinu, tímalína ekki ákvörðuð.

<sup>8</sup> Clark D. E., Gunnarsson I., Aradóttir E. S., Þ. Arnarson M., Þorgeirsson Þ. A., Sigurðardóttir S. S., Sigfússon B., Snæbjörnsdóttir S. Ó., Oelkers E. H. and Gíslason S. R. (2018) The chemistry and potential reactivity of the CO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>S charged injected waters at the basaltic CarbFix2 site, Iceland. Energy Procedia 146, 121–128.

<sup>9</sup> Snæbjörnsdóttir S. Ó., Oelkers E. H., Mesfin K., Aradóttir E. S., Dideriksen K., Gunnarsson I., Gunnlaugsson E., Matter J. M., Stute M. and Gíslason S. R. (2017) The chemistry and saturation states of subsurface fluids during the in situ mineralisation of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S at the CarbFix site in SW-Iceland. International Journal of Greenhouse Gas Control 58, 87–102.

<sup>10</sup> Tómasdóttir S. (2022) Grunnvatn á Hellisheiði. Reykjavík Energy - Rannsóknir og Nýsköpun, Report Nr. 2022-0004.



**Skýringar**

Mörk	Húsmúli (djúpkerfi)	Orca (Þrengslí)	Mammoth (Jarðhitagarður)	Þróunarmiðstöð fyrir loftþreinsitækni (Jarðhitagarður)*	Vöktunarholur fyrir jarðhitagarð* og Mammoth
<ul style="list-style-type: none"> <li>Vöktunarsvæði</li> <li>Iðnaðarsvæði</li> <li>Vatnsvendursvæði</li> <li>Geymslusvæði/-samstæða</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Niðurdælingarholur</li> <li>Svæðismörk</li> <li>Vöktunarholur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Niðurdælingarholur</li> <li>Svæðismörk</li> <li>Vöktunarholur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Niðurdælingarholur</li> <li>Svæðismörk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Niðurdælingarholur</li> <li>Svæðismörk</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vöktunarholur fyrir jarðhitagarð* og Mammoth</li> </ul>

\*Tímalína ekki ákvörðuð

Mynd 3. Kortið sýnir leyfismörk sem sótt er um, mörk geymslugeymis og aðrar viðeigandi upplýsingar. Vöktunarsvæðið hefur sömu mörk og svæði starfsleyfis til geymslu.

## Viðauki A – Efnafræði vatns, vöktunarbreytur

Carbfix tækni byggir á því að hraða náttúrulegum ferlum þar sem CO<sub>2</sub> er leyst upp í vatni og dælt niður í berglög. Við það losna málmar á borð við kalsíum (Ca), magnesíum (Mg) og járn (Fe). Með tímanum bindast þessir málmar hinu uppleysta CO<sub>2</sub> og mynda stöðugar karbónatsteindir. Sýnt hefur verið fram á að basalt inniheldur ekki aðeins bergmyndandi efni eins og SiO<sub>2</sub>, Na, Ca, Mg eða K, heldur einnig málma sem geta verið skaðlegir umhverfinu svo sem As, Cd, Hg eða Pb, þó í snefilmagni. Styrkur þeirra efna sem finnast bæði í grunnvatni og vatni geymslugeymisins takmarkast þó því þau ganga inni í síðsteindir. Þar sem stöðugleiki síðsteinda er almennt minni við lágt sýrustig (pH) er styrkur málma í vatninu mestur í grennd við niðurdælingarholur en í lengri fjarlægð þar sem pH er hlutleyst vegna frekari uppleysingar basalts sem og útpynningar niðurdælingarvökvans vegna blöndunar við vatn úr geymslugeymi. Vegna ofantalinna atriða er ekki gert ráð fyrir neikvæðum áhrifum á efnafræðilega gæðapætti efstu laga grunnvatns fjarri niðurdælingarholunum. Til að vakta ofangreind ferli neðanjarðar er vatnssýnum safnað (niðurdælingarvökva, vökva úr geymslugeymi og grunnvatni) og þau efnagreind þar sem mismunandi þættir sem sýndir eru í Tafla 1 eru vaktaðir út frá mismunandi skilyrðum:

- 1) Vöktunarbreytur sem þarf til að túlka efnahvörf í geymslugeymi og steinrenningarferli (kafli 2)
- 2) Málmar í basalti sem hafa tilgreind viðmiðunarmörk í Vöktunaráætlun 2022-2027, byggt á lögum nr. 36/2011 eða íslensku innleiðingu vatnatilskipunar Evrópu (EB 2000/60).
- 3) Eftirlitsskyld efni í annarri viðeigandi löggjöf um grunnvatnsauðlindir (reglugerð 797/1999, reglugerð 536/2001) sem eru annaðhvort
  - a) mögulega tengd staðbundinni losun úr bergi geymslugeymis í vökva geymslugeymi í viðeigandi magni eða
  - b) mögulega til staðar í niðurdælingarvatninu í viðeigandi magni

Þær vöktunarbreytur sem falla undir fyrsta viðmiðið eru sýrustig (pH), hitastig, leiðni, styrkur uppleysts ólífræns kolefnis (DIC) styrkur algengra katjóna svo sem Si, Al, Na, K, Fe, Mg, Ca, B ásamt anjónsúlfati, klóríði og flúoríði. Í djúpkerfinu (Húsmúla) skiptir styrkur H<sub>2</sub>S einnig máli vegna áhrifa jarðhita og niðurdælingar. Málmar sem skipta máli fyrir seinna viðmiðið eru málmar á borð við As, Cd, Hg og Pb sem verða mældir óháð öðrum viðmiðum (sjá Tafla 4).

Þriðja og síðasta viðmiðið var byggt á efnafræðilegum greiningum á 1) jarðhitavatni á yfirborði og 2) tilraunum þar sem CO<sub>2</sub>-hlaðinn vökvi hvarfast við basalt:

Súrt gufuhitað súlfatvatn sem á uppruna sinn úr basaltberglögum á Íslandi getur haft sýrustig á bilinu 3 – 5 og hitastig á milli 60 – 96°C<sup>11</sup>. Þetta vatn hefur álíka sýrustig og CO<sub>2</sub> hlaðinn niðurdælingarvökvi í grennd niðurdælingahola og líklegt er að styrkur málma í vatninu er háð upplausn basalts. Súlfatvatnið er hins vegar heitara en grunnvatn í efri lögum og inniheldur meira magn af SO<sub>4</sub> sem leiðir til meiri hreyfanleika málma en þegar CO<sub>2</sub> hlaðinn vökvi á í hlut. Á sama hátt var styrkur málma vaktaður í tilraunum þar sem CO<sub>2</sub> hlaðið vatn hvarfast við mulið basaltgler í hvarfastokk (e. column reactor) 22°C og 50°C niður í pH 4,1<sup>12</sup>. Í báðum tilvikum var hæst mældi styrkur borinn saman við viðmiðunarmörk tilgreind í reglugerð 536/2001 um neysluvatn og Vöktunaráætlun vatnaáætlunar 2022-2027 fyrir lög um stjórn vatnamála nr. 36/2011, sjá Tafla 4. Fyrir efni og efnasambönd á lista I og II í reglugerð 797/1999 um varnir gegn mengun grunnvatns og eru án viðmiðunarmarka var vöktun þeirra metin út frá vísbendingum um innihald þeirra í basalti og náttúrulegan hreyfanleika þessara málma, sjá Tafla 4.

<sup>11</sup> Kaasalainen H. and Stefánsson A. (2012) The chemistry of trace elements in surface geothermal waters and steam, Iceland. Chemical Geology 330–331, 60–85.

<sup>12</sup> Galeczka I., Wolff-Boenisch D., Oelkers E. H. and Gislason S. R. (2014) An experimental study of basaltic glass–H<sub>2</sub>O–CO<sub>2</sub> interaction at 22 and 50°C: Implications for subsurface storage of CO<sub>2</sub>. Geochimica et Cosmochimica Acta 126, 123–145.

Eina efnið sem fellur undir skilyrði 3b tengist niðurdælingu frá Mammoth (Jarðhitagarði) þar sem snefilmagn af ammóníum, járni og heildarmagn lífræns kolefnis (TOC) getur verið tímabundið til staðar í niðurdælingarvatninu við ræsingu föngunarstöðvar Climeworks. Við þessa starfstöð er einnig fylgst með magni nítrats þar sem það getur myndast við afoxun á ammóníum.

Listi yfir málma og anjónir sem vaktaðar verða vegna ofangreindra skilyrða er sýndur í Tafla 4 og eru viðbótarbreytur sýndar í Tafla 1.



Tafla 4: Samanburður efna sem koma fram í viðeigandi löggjöf um grunnvatn og neysluvatn við styrk í svipuðu náttúrulegu umhverfi, við tilraunir og í basalti. Í síðasta dálkinum eru talin upp þau efni sem vöktuð verða þar sem tölur vísa til skilyrða í textanum hér að ofan. NT = Efni ekki á lista í reglugerð 797/1999 án viðmiðunarmarka (e. No threshold). ND = Ekki ákveðið (e. Not determined). NA = Á ekki við (e. Not applicable).

		Reglugerð 797/1999		Reglugerð 536/2001	Vöktunaráætlun vatnaáætlunar 2022-2027		Gufuhitað sýru-súlfat vatn við pH 3-5 á basalt svæðum á Íslandi <sup>11</sup>	Basalt tilraunir með CO <sub>2</sub> -hlöðnu vatni við 22-50°C <sup>12</sup>	Styrkur í basalt gleri (Stapafell, Ísland) <sup>13</sup>	Vöktuð efni og skilyrði
		Listi I	Listi II	Viðmiðunargildi µg/L	Viðsnúningsgildi µg/L	Viðmiðunargildi µg/L				
Al	Ál			200			<b>3918</b>	<b>16569</b>	76371	1, 3a
Ag	Silfur		X				ND	ND	0.03	
As	Arsen		X	10	7.5	10	0.8	<b>24</b>	0.1	2, 3a
B	Bós		X	1000			130	36	1.1	1
Ba	Barín		X				49	ND	80	3a(NT)
Be	Berýllíum		X				ND	ND	0.7	
Cd	Kadmín	X		5	3.75	5	0.056	ND	0.1	3
Co	Kóbalt		X				1.6	ND	52	3a(NT)
Cr	Króm		X	50			8.5	49	646	
Cu	Kopar		X	2000			2.1	ND	136	
Fe	Járn			200			<b>15400</b>	<b>15794</b>	84491	1, 3a
Hg	Kvikasilfur	X		1	0.75	1	ND	ND	0.004	2
Mn	Mangan			50			2613	6525	1487	3a
Mo	Mólybden		X				0.7	26	0.9	3a(NT)
Na	Natríum			200000			55600	ND	14169	1
Ni	Nikkel		X	20			6.3	ND	153	
Pb	Blý		X	10	7.5	10	1.6	ND	0.8	2
Sb	Antímón		X	5			0.04	ND	0.05	
Se	Selen		X	10			ND	ND	0.399 <sup>14</sup>	
Sn	Tin		X				ND	ND	1.9	
Te	Tellúr		X				ND	ND	0.02	
Ti	Títan		X				ND	ND	9410 <sup>15</sup>	
Tl	Þalín		X				ND	ND	0.01	
U	Úran		X				ND	ND	0.2	
V	Vanadín		X				31	18	296	3a(NT)
Zn	Sink		X				73	ND	162	3a(NT)
Cl <sup>-</sup>	Klóríð			250000	250000	187500	15000	222	NA	1
F <sup>-</sup>	Flúoríð		X	1500			226	ND	NA	1
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Súlfat			250000	250000	187500	NA	315	NA	1

<sup>13</sup> Stockmann G. J., Shirokova L. S., Pokrovsky O. S., Bénézech P., Bovet N., Gislason S. R. and Oelkers E. H. (2012) Does the presence of heterotrophic bacterium Pseudomonas reactants affect basaltic glass dissolution rates? Chemical Geology 296–297, 1–18.

<sup>14</sup> Yierpan A., Redlinger J. and König S. (2021) Selenium and tellurium in Reykjanes Ridge and Icelandic basalts: Evidence for degassing-induced Se isotope fractionation. Geochimica et Cosmochimica Acta 313, 155–172.

<sup>15</sup> Mjög lítill hreyfanleiki, sjá heimild<sup>12</sup>.