

Háhitasvæðin á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli

Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2021

The background of the lower half of the page features an abstract graphic of flowing water. It consists of numerous curved, overlapping lines in shades of light blue and white, some solid and some dashed, creating a sense of movement and depth. Small white arrowheads are placed on some of the lines, indicating the direction of flow.



Háhitasvæðin á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli

Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2021

Finnbogi Óskarsson
Deirdre Clark
Heimir Ingimarsson
Auður Agla Óladóttir

Desember 2021



ÍSOR-2021/048
Project no.: 21-0108

Lykilsíða

Skýrsla LV nr.	LV-2021-054	Dagsetning	Desember 2021
Fjöldi Síðna	77	Upplag	1
Dreifing	<input type="checkbox"/> Birt á vef LV	<input checked="" type="checkbox"/> Opin	<input type="checkbox"/> Takmörkuð til [Dags.]
Titill	Háhitavæðin á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2021.		
Höfundar/fyrirtæki	Finnbogi Óskarsson, Deirdre Clark, Heimir Ingimarsson og Auður Agla Óladóttir		
Verkefnisstjóri	Ásgerður K. Sigurðardóttir f.h. LV	Steinþór Niélsson f.h. ÍSOR	
Unnið fyrir	Landsvirkjun		
Samvinnuaðilar	—		
Útdráttur	<p>Jarðhitavirkni á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli hefur verið kortlögð og könnuð reglulega á síðustu áratugum. Tilgangurinn er að fylgjast með breytingum á virkninni með ýmsum aðferðum. Árið 2021 var eftirlitið einskorðað við sýnatöku úr gufuaugum og grunnvatnseftirlit en yfirborðsvirkni var ekki kortlögð.</p> <p>Safnað var sýnum til efnagreininga úr gufuaugum á öllum svæðunum þremur. Hvergi var um umfangsmiklar breytingar að ræða. Þó má nefna að gasstyrkur í gufu við sæluhúsið á Þeistareykjum fer enn lækkandi og sama á við um gufuauga í gílinu ofan við holu B-9 í Bjarnarflagi og einnig augað í Leirhnjúki. Ekki er ljóst hvað veldur lækkandi gasstyrk á fyrrnefndu stöðunum tveimur en líklegt er að niðurdæling í holu K-35 í Kröflu hafi valdið kólnun jarðhitakerfisins undir Leirhnjúki.</p> <p>Grunnvatnssýnum var safnað á átján stöðum í Mývatnssveit, fjórum stöðum á Þeistareykjum og fjórum í Kelduhverfi, líkt og undanfarin ár. Markmiðið með vöktuninni er að meta áhrif affallsvatns frá virkjununum. Vöktunin 2021 sýnir nokkrar breytingar frá fyrri árum. Eftirlit með efnasamsetningu grunnvatns síðustu áratugina sýnir að vatn í lindum við Mývatn og grunnvatn vestan Námafjalls hefur ekki orðið fyrir neinum áhrifum frá affallsvatni frá Bjarnarflagsvirkjun eða Kröfluvirkjun hvað varðar styrk arsens og áls. Hins vegar hefur styrkur áls hækkað á þremur stöðum, Grjótagjá, Vogagjá og Langavogi, og er rétt að fylgjast með því. Einnig hefur styrkur síns hækkað upp að umhverfismörkum I ($5 \mu\text{g} / \text{L}$) í volgum lindum við Bjarg og Helgavog. Engin ummerki um affallsvatn frá Þeistareykjavirkjun sjást heldur á vöktunarstöðum á Þeistareykjum og í Kelduhverfi.</p>		
Lykilorð	Þeistareykir, Krafla, Námafjall, Bjarnarflag, Mývatnssveit, Kelduhverfi, umhverfisáhrif, yfirborðsáhrif, gufusýni, grunnvatn, Landsvirkjun, ÍSOR		

Undirskrift verkefnisstjóra

Steinþór Niélsson

Yfirfarið

Iwona Galeczka

Samþykki verkefnisstjóra
Landsvirkjunar

Efnisyfirlit

1	Inngangur	9
2	Efnasamsetning gufu úr gufuaugum	11
2.1	Þeistareykir	11
2.1.1	Sýnatökustaðir.....	11
2.1.2	Niðurstöður gufuefnagreininga	15
2.1.3	Söguleg samantekt.....	19
2.2	Krafla.....	21
2.2.1	Sýnatökustaðir.....	21
2.2.2	Niðurstöður gufuefnagreininga	24
2.2.3	Söguleg samantekt.....	28
2.3	Námafjall	30
2.3.1	Sýnatökustaðir.....	30
2.3.2	Niðurstöður gufuefnagreininga	33
2.3.3	Söguleg samantekt.....	36
3	Vöktun á efnasamsetningu grunnvatns	38
3.1	Mývatnssveit.....	38
3.1.1	Næringarefni í sýnum úr Mývatnssveit	56
3.1.2	Ferilefni í sýnum úr Mývatnssveit	57
3.2	Þeistareykir og Kelduhverfi.....	58
3.2.1	Ferilefni í sýnum frá Þeistareykjum og Kelduhverfi	66
3.3	Vísar og sjálfbærni.....	66
4	Helstu niðurstöður	69
4.1	Gufuaugu	69
4.1.1	Þeistareykir	69
4.1.2	Krafla	69
4.1.3	Námafjall.....	70
4.2	Grunnvatn	70
4.2.1	Mývatnssveit	70
4.2.2	Þeistareykir og Kelduhverfi	71
5	Heimildaskrá	72
	Viðauki: Sýnameðhöndlun og efnagreiningaraðferðir	76

Töflur

Tafla 1.	Sýnatökustaðir á Þeistareykjum sumarið 2021	11
Tafla 2.	Efnasamsetning gufusýna frá Þeistareykjum sumarið 2021	15
Tafla 3.	Reiknaður efnahiti sýna úr gufuaugunum fjórum á Þeistareykjum	17
Tafla 4.	Sýnatökustaðir í Kröflu sumarið 2021	21
Tafla 5.	Efnasamsetning gufusýna úr Kröflu sumarið 2021	25

Tafla 6. Reiknaður efnahiti sýna úr gufuaugunum þremur á Kröflusvæðinu	27
Tafla 7. Sýnatökustaðir í Námafjalli sumarið 2021	30
Tafla 8. Efnasamsetning gufusýna frá Námafjallssvæðinu sumarið 2021.....	33
Tafla 9. Reiknaður efnahiti sýna úr gufuaugunum þremur á Námafjallssvæðinu	34
Tafla 10. Vöktunarstaðir og yfirlit um dælt magn úr vöktunarholum í Mývatnssveit 2021	40
Tafla 11. Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum haustið 2021	41
Tafla 12. Umhverfismörk fyrir málma í yfirborðsvatni til verndar lífríki	45
Tafla 13. Vinnsla vökva í Bjarnarflagi (í þúsundum tonna) frá 2016 til 2021	45
Tafla 14. Niðurdæling og vinnsla vökva í Kröflu (í þúsundum tonna) frá 2015 til 2021	46
Tafla 15. Niðurstöður efnagreininga á næringarefnum í sýnum úr Mývatnssveit	56
Tafla 16. Niðurstöður greininga á ferilefnum í sýnum úr Mývatnssveit	57
Tafla 17. Vöktunarstaðir og yfirlit um dælt magn úr vöktunarholum á Þeistareykjum og í Keldu- hverfi 2021.	58
Tafla 18. Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum á Þeistareykjum 2021	61
Tafla 19. Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum í Kelduhverfi 2021.....	62
Tafla 20. Niðurstöður greininga á ferilefnum í sýnum frá Þeistareykjum og Kelduhverfi	66

Myndir

Mynd 1. Yfirlitskort af þeim svæðum sem fjallað er um í skýrslunni.....	10
Mynd 2. Gufuaugu á Þeistareykjum.....	12
Mynd 3. Gufuaugað Þ G-101 í gili sunnan við sæluhúsið.....	13
Mynd 4. Undirbún. sýnatöku úr gufuauganu Þ G-102 í norðurenda skálar í hlíðum Ketilfjalls	13
Mynd 5. Gufuaugað Þ G-103 í flagi vestan undir syðsta hluta Tjarnaráss	14
Mynd 6. Sýnataka úr gufuauganu Þ G-109 á sunnanverðum Röndum	14
Mynd 7. Gasstyrkur í gufu og samsætu hlutföll í þéttivatni úr gufuaugum á Þeistareykjum.....	16
Mynd 8. Samsætuvið sýna árána 2012–2021 úr gufuaugum á Þeistareykjum	19
Mynd 9. Gufuaugu í Kröflu	22
Mynd 10. Gufuaugað K G-104 í austurhlíð Leirhnjúks	23
Mynd 11. Undirbúningur gufusýnatöku úr gufuauganu K G-106 í gili vestan við holu K-14.....	23
Mynd 12. Sýnataka úr gufuauganu K G-107 í gígskál norðan Vítis.....	24
Mynd 13. Gasstyrkur í gufu og samsætu hlutföll í þéttivatni úr gufuaugum í Kröflu 2012–2021	26
Mynd 14. Samsætuvið sýna árána 2012–2021 úr gufuaugum á Kröflusvæðinu.....	28
Mynd 15. Gufuaugu í Námafjalli og Bjarnarflagi	31
Mynd 16. Undirbúningur sýnatöku úr gufuauganu N G-105 í gili upp af holu B-9 í Bjarnarflag.....	31
Mynd 17. Sýnataka úr gufuauga N G-106 í flagi vestan holu H-9 á Hverum.....	32
Mynd 18. Gufuaugað N G-109 á Námafjalli. Syðsta-Kolla í bakgrunni	32
Mynd 19. Gasstyrkur í gufu og samsætu hlutföll í þéttivatni úr gufuaugum á Námafjallssvæðinu	35
Mynd 20. Samsætuvið sýna árána 2012–2021 úr gufuaugum á Námafjallssvæðinu.....	36
Mynd 21. Sýnatökustaðir í Mývatnssveit.....	39
Mynd 22. (A) Styrkur arsens í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflags- lóni ásamt umhverfismörkum I, II, III og IV og mörkum fyrir neysluvatn (10 µg/L).....	48

Mynd 23. Styrkur áls í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflaglóni ásamt viðmiðunarmörkum fyrir neysluvatn (200 µg/L)	48
Mynd 24. Styrkur kopars (A), sínks (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflaglóni ásamt umhverfismörkum	49
Mynd 25. Styrkur arsens (A), klóríðs (B), kísils (C), natríums (D), bórs (E) og brómíðs (F) í vatni frá Bjarnarflaglóni	50
Mynd 26. Styrkur arsens í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum	51
Mynd 27. Styrkur áls í vatni úr borholum ásamt viðmiðunarmörkum fyrir neysluvatn	51
Mynd 28. Styrkur kopars (A), sínks (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum	52
Mynd 29. Styrkur arsens og áls í lindum við Mývatn ásamt umhverfismörkum	53
Mynd 30. Styrkur kopars (A), sínks (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum	54
Mynd 31. Styrkur áls (A), pH (B), kísils (C), natríums (D), bórs (E) og flúors (F) í vatni frá Grjótagjá, Vogagjá og Langavogi	55
Mynd 32. Styrkur köfnunarefnis og fosfats í sýnum úr Mývatnssveit	56
Mynd 33. Sýnatökustaðir í Kelduhverfi og á Þeistareykjum	59
Mynd 34. Styrkur arsens (A) og áls (B) í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum ..	63
Mynd 35. Styrkur arsens (A) og áls (B) í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum	63
Mynd 36. Styrkur kopars (A), sínks (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum	64
Mynd 37. Styrkur kopars (A), sínks (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum	65
Mynd 38. Styrkur arsens (A), króms (B), kísils (C), hitastig (D) og rafleiðni (E) á völdum stöðum í Mývatnssveit	67
Mynd 39. Styrkur arsens (A), króms (B), kísils (C), hitastig (D) og rafleiðni (E) á völdum stöðum í Kelduhverfi og á Þeistareykjum	68

1 Inngangur

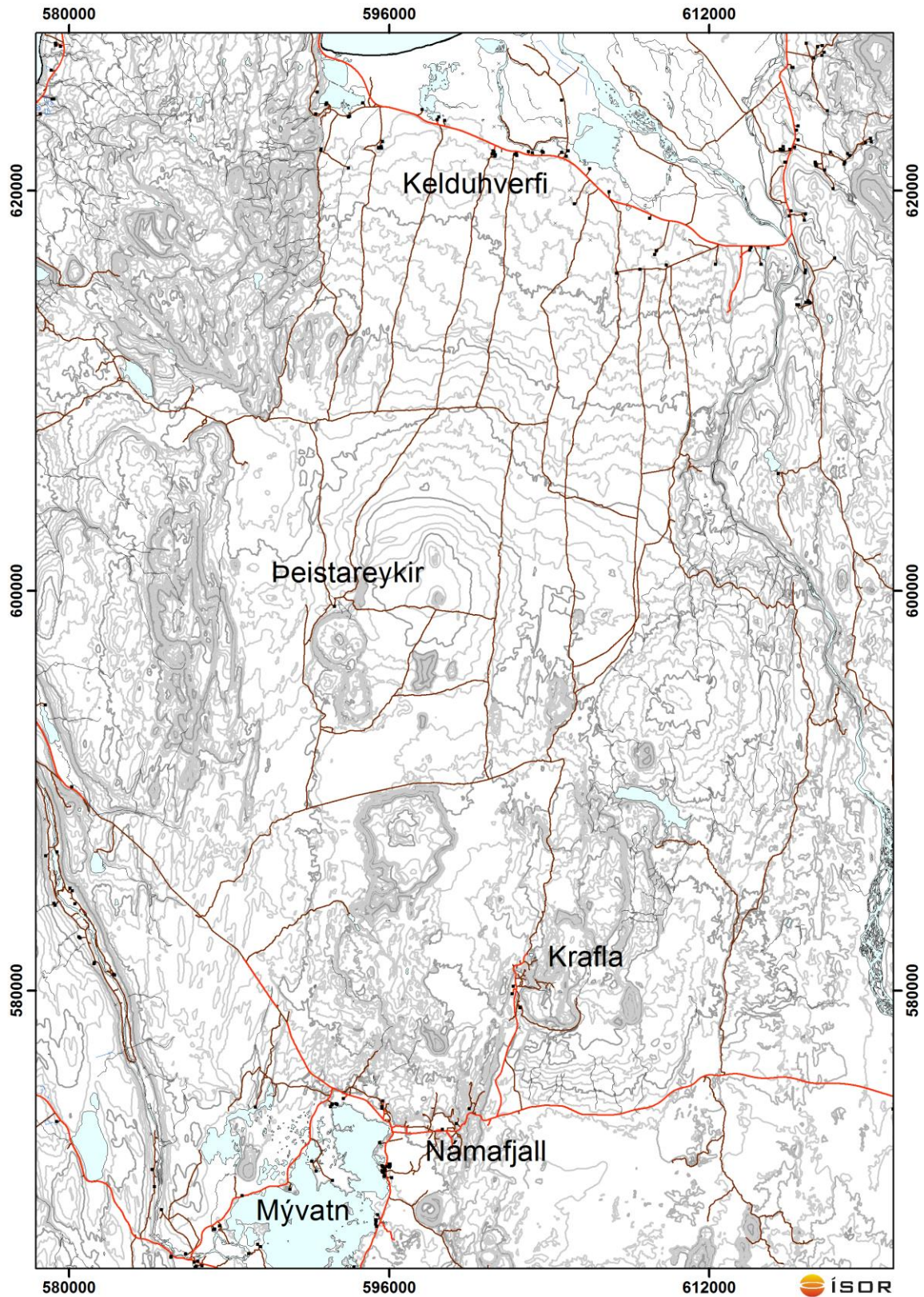
Íslenskar orkurannsóknir (ÍSÖR) hafa sinnt vöktun á umhverfisáhrifum jarðhitanytingar á virkjanasvæðum Landsvirkjunar á Norðausturlandi með svipuðum hætti síðan árið 2012 en lengur hefur verið fylgst með áhrifum jarðhitanytingar á grunnvatn. Tilgangurinn er að fylgjast með þeim breytingum sem hafa orðið á jarðhitavirkni og efnasamsetningu grunnvatns á þessum svæðum undanfarin ár og áratugi hvort heldur sem er af náttúrulegum orsökum eða af völdum jarðhitanytingar. Niðurstöðurnar leggja síðan grunn að frekara eftirliti til framtíðar.

Athuganirnar voru í nokkuð föstum skorðum fyrstu sjö árin. Hvert ár var lögð áhersla á eitt af svæðunum þremur en minna gert á hinum tveimur. Þannig var áherslan á Þeistareykjvík árin 2012, 2015 og 2018, Námafjall árin 2013 og 2016 og Kröflu árin 2014 og 2017 (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2013a, 2013b, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018). Árið 2019 var ekki lögð sérstök áhersla á eitt þessara þriggja svæða heldur umfang eftirlitsins minnkað og einskorðað við gufusýnatöku og grunnvatnseftirlit eins og áður (Finnbogi Óskarsson o.fl., 2019). Árið 2020 var breytt um aðferðafræði við kortlagningu yfirborðsvirkni á Þeistareykjum og í stað athugana á jörðu niðri voru teknar ljósmyndir og hitamyndir úr lofti með flygildi, auk mælinga á gasflæði um jarðveg á Þeistareykjum og hefðbundins grunnvatnseftirlits (Albert Þorbergsson o.fl., 2020).

Í þessari skýrslu er greint frá niðurstöðum umhverfisvöktunar árið 2021. Að þessu sinni var áherslan lögð á efnasamsetningu gufu úr gufuaugum á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli, svo og efnasamsetningu grunnvatns í Mývatnssveit, á Þeistareykjum og í Kelduhverfi (mynd 1). Niðurstöður ársins eru bornar saman við eldri athuganir á svæðunum.

Gufusýni voru tekin úr tíu gufuaugum á jarðhitasvæðunum þremur og efnasamsetning gufu borin saman við eldri efnagreiningar frá sömu slóðum. Efnasamsetning gufu stjórnast m.a. af hitastigi í jarðhitakerfinu og langtímabreytingar á gufunni gefa því vísbendingar um þróun hitastigs í kerfunum. Þá komu fram miklar breytingar á gufusamsetningu í tengslum við eldsumbrotin í Kröflu sem enn eimir eftir af og er markmið eftirlitsins með efnasamsetningu gufu einnig að fylgjast með því hvernig þær breytingar ganga til baka.

Reglubundið eftirlit er haft með efnasamsetningu grunnvatns í nágrenni jarðhitavirkjana Landsvirkjunar á Norðausturlandi til að kanna áhrif affallsvatns frá virkjununum á grunnvatnið í nágrenni þeirra. Vöktun á grunnvatni í Mývatnssveit hófst í núverandi mynd árið 2003 og voru sýni lengst af tekin tvisvar á ári, að vori og hausti. Fyrirkomulaginu var breytt árið 2014 og eru sýni nú tekin einu sinni á ári en sýnatökustöðum var á móti fjölgað verulega. Haustið 2021 var vatnssýnum safnað á átján stöðum í Mývatnssveit. Sams konar árleg vöktun á grunnvatni í Kelduhverfi hefur farið fram frá árinu 2007 en sýnatökustöðum á Þeistareykjum var bætt við árið 2013. Haustið 2021 var fjórum grunnvatnssýnum safnað í Kelduhverfi og fjórum á Þeistareykjum.



Mynd 1. Yfirlitskort af þeim svæðum sem fjallað er um í skýrslunni.

2 Efnasamsetning gufu úr gufuaugum

2.1 Þeistareykir

2.1.1 Sýnatökustaðir

Fjórum sýnum af gufu og þéttivatni var safnað úr gufuaugum á Þeistareykjum miðvikudaginn 11. ágúst 2021, í heitu, björtu og stilltu veðri. Vegna þess hve hlýtt og sólríkt var reyndist óvenju erfitt að sjá gufu úr sýnatökustöðunum eða annarri yfirborðsvirkni. Þetta var sem sagt slæmt gufuveður. Svæðið var líka allt miklu þurrara en undanfarin ár, enda hafði mjög lítið rígt um sumarið. Sýnatöku- og efnagreiningaraðferðum er lýst í viðauka aftast í skýrslunni.

Til stóð að safna sýnum úr sömu fjórum gufuaugum og árið 2019; G-101 við sæluhúsið, G-102 í Ketilfjalli, G-103 í sunnanverðum Tjarnarási og G-109 á sunnanverðum Röndum, enda spanna þau svæðið ágætlega.

Yfirlit um sýnatökustaði er sýnt í töflu 1 og staðsetning þeirra er sýnd á mynd 2 ásamt öðrum gufuaugum sem sýni hafa verið tekin úr á Þeistareykjum (Gestur Gíslason o.fl., 1984; Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2013a; 2013b; 2014, 2015, 2016, 2017, 2018; Finnþogi Óskarsson o.fl., 2019). Í gagnagrunni ÍSOR eru sýnatökustaðirnir kallaðir „Þ G-101“ og svo framvegis en í texta og á myndum hér á eftir eru nöfn gufuaugna víða stýtt í „G-101“ til einföldunar.

Tafla 1. Sýnatökustaðir á Þeistareykjum sumarið 2021.

Nafn auga*	Staðar-númer	Eldri sýni**	x-hnit	y-hnit	Hæð (m y.s.)	Lýsing
G-101	H 10182	G-1	593218	599177	357	Í gili við sæluhús
G-102	H 10183	G-3	594555	599915	465	Í skál í Ketilfjalli
G-103	H 10184	G-6	592595	598816	343	Í leirflagi syðst í Tjarnarási
G-109	H 93591	G-10	592020	598105	338	Sunnarlega á Röndum

* Nöfn gufuaugna eru stýtt. Fullt nafn í gagnagrunni ÍSOR er „Þ G-101“ o.s.frv.

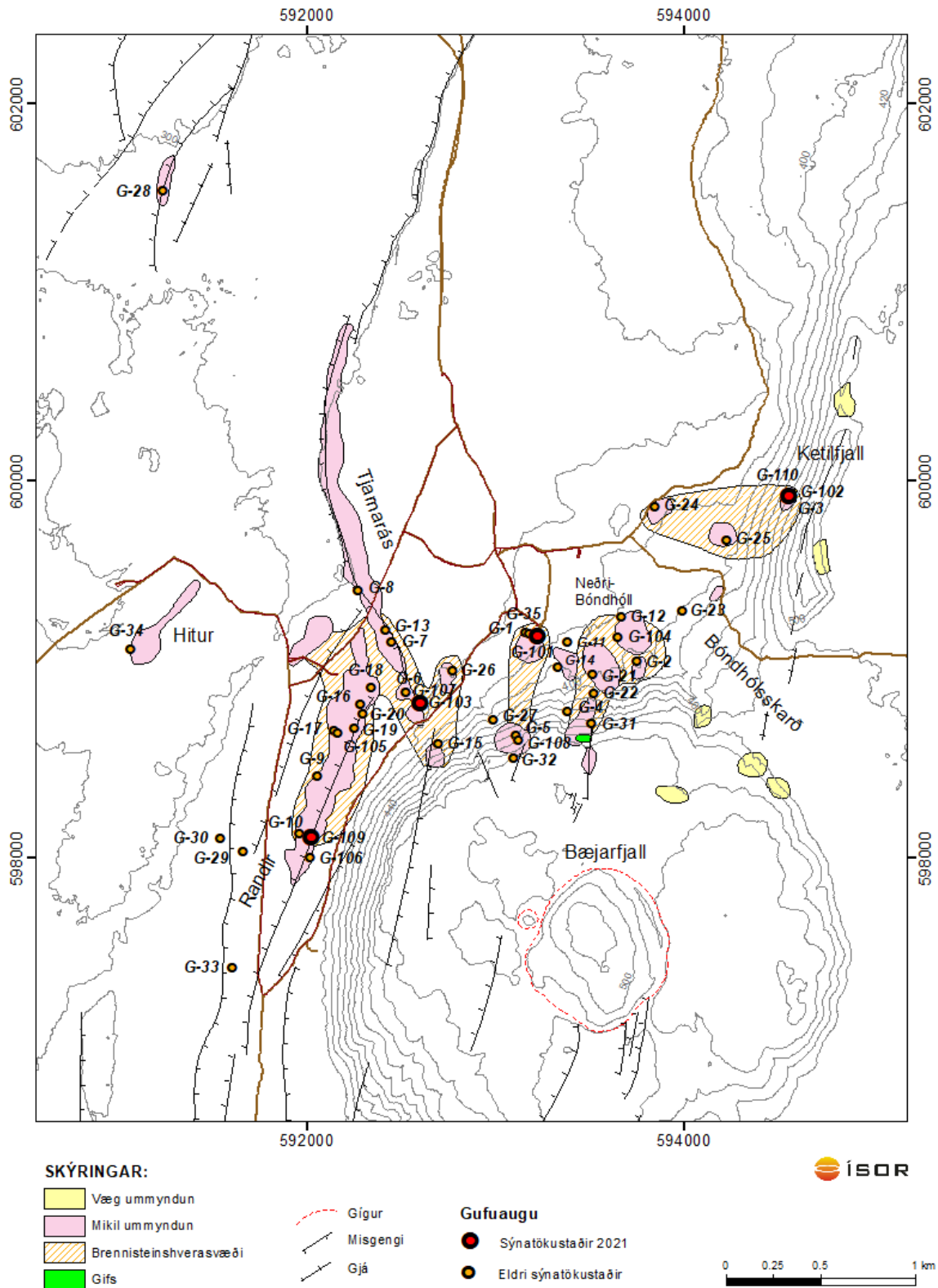
** Hér er vísað til gufuaugna sem lýst er í skýrslu Gests Gíslasonar o.fl. (1984).

Þ G-101: Sæmilegt en ekki mjög fókuserað gufuauga við hveralæk sunnan við sæluhús. G-101 er aðeins austar en G-1, í leirhólum í lækjarfarveginum. Árið 2021 var lækjarfarvegurinn alveg þurr og G-101 með aumasta móti og hitastig heldur lægra en vant er, aðeins 97,5°C, en hefur flest ár verið 98,5°C eða hærra (myndir 2 og 3).

Þ G-102: Mjög öflugt auga í skál í Ketilfjalli á slóðum gamla G-3. Öflug gufuvirkni er bæði sunnan og norðan til í skálinni en flest undanfarin ár hefur sýnum verið safnað úr auga í skálinni norðanverðri, og það var einnig gert nú. Árin 2018 og 2019 var augað norðan í skálinni í blautara lagi og þau ár var sýni því safnað úr auga sunnan í skálinni, þar sem sýnatökustaðurinn G-3 var fyrrum (myndir 2 og 4).

Þ G-103: Frekar kraftlítið en skýrt afmarkað og fókuserað auga sunnan til í leirflagi syðst í Tjarnarási og rétt norðan vegarins undir Bæjarfjalli. Að þessu sinni var safnað úr auganu G-103 sem er sunnan til í flaginu. Augað G-107 sem stundum hefur verið safnað úr undanfarin ár er norðar í sama flagi. Í sama flagi var sýnatökustaðurinn G-6 til forna (myndir 2 og 5).

Þ G-109: Sæmilegt gufuauga á sunnanverðum Röndum, u.þ.b. 100 m norðan við auga G-106. Á svipuðum slóðum var áður augað G-10. Sýni var fyrsta sinni safnað úr þessu auga sumarið 2018 en þá var það mun kraftmeira (myndir 2 og 6).



Mynd 2. Gufuaugu á Beistareykjum. Gufuaugu sem safnað var úr sumarið 2021 eru sýnd með rauðum táknum.



Mynd 3. Gufuaugað Þ G-101 í gili sunnan við sæluhúsið. Lækjarfarvegurinn var alveg þurr.



Mynd 4. Undirbúningur sýnatöku úr gufuauganu Þ G-102 í norðurenda skálar í hliðum Ketilfjalls.



Mynd 5. Gufuaugað P G-103 í flagi vestan undir syðsta hluta Tjarnaráss.



Mynd 6. Sýnataka úr gufuauganu P G-109 á sunnanverðum Röndum.

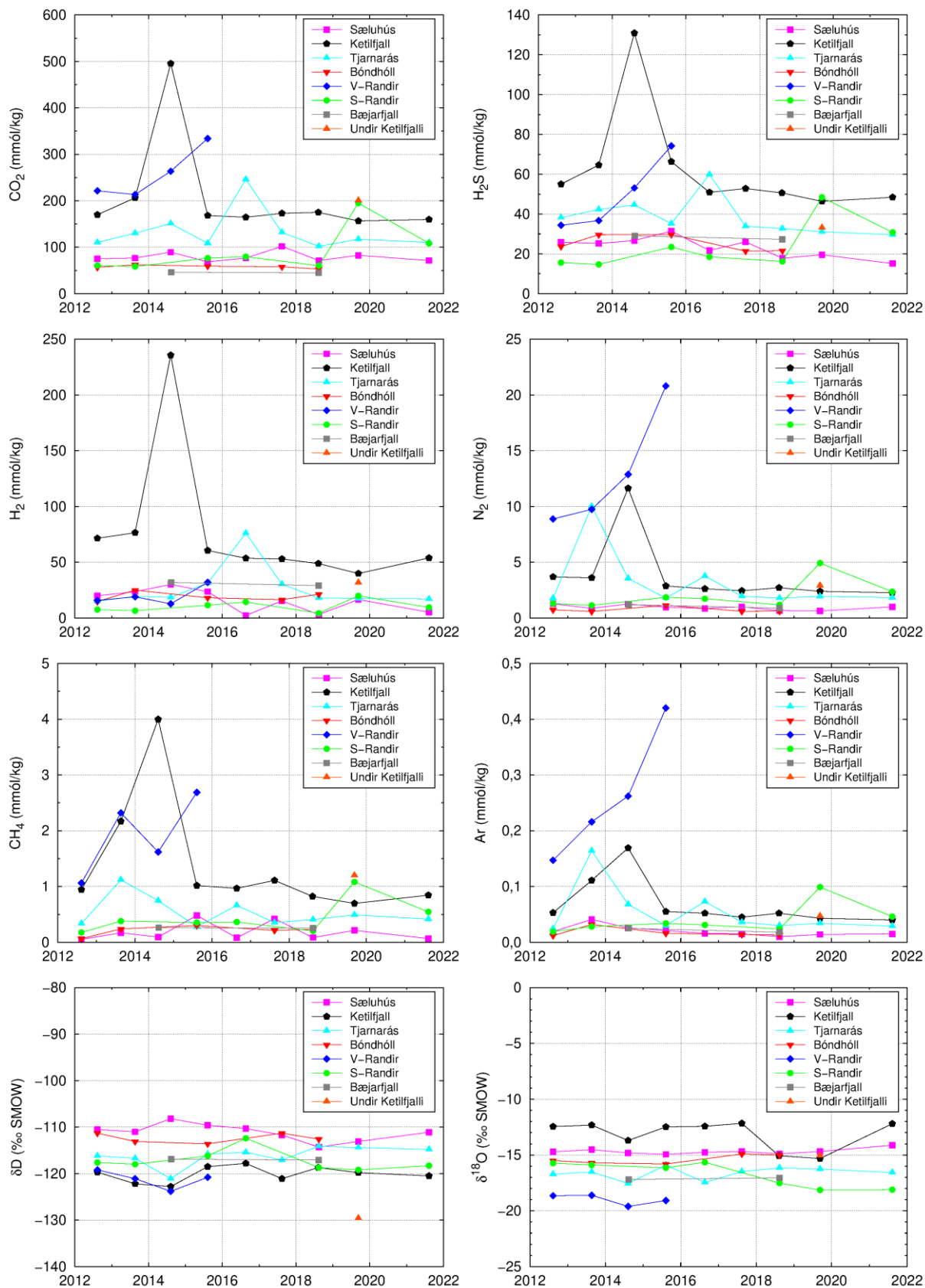
2.1.2 Niðurstöður gufuefnagreininga

Niðurstöður efnagreininga sýna sem tekin voru á Þeistareykjum sumarið 2021 eru skráðar í töflu 2 og á mynd 7 er sýndur styrkur gastegunda og hlutföll stöðugra samsætna vetnis og súrefnis í gufu frá Þeistareykjum með tíma, frá árinu 2012. Samsætuvegir í sýnunum er teiknað á mynd 8, ásamt úrkomulínu Craigs (1961) og suðuferlum fyrir grunnvatn og djúpvökva borholna.

Í töflu 3 er sýndur áætlaður djúphiti sýna úr þeim fjórum gufuaugum sem safnað var úr að þessu sinni, reiknaður út frá mældum styrk hinna ýmsu gastegunda. Notast er við kvarðanir Stefáns Arnórssonar o.fl. (1998) sem reiknaðar eru út frá ætluðu jafnvægi við steindafylkin klínózóisít-kalsít-kvars-prehnít (CO₂) og pýrít-pýrrhótít-prehnít-epidót (H₂S og H₂). Fyrir Þeistareyki er notuð sú kvörðun CO₂-hitamælisins sem gerir ekki ráð fyrir miklu CO₂-flæði frá kviku.

Tafla 2. Efnasamsetning gufusýna frá Þeistareykjum sumarið 2021.

Sýni	20210276	20210279	20210278	20210277
Dagsetning	11.08.2021	11.08.2021	11.08.2021	11.08.2021
Staður	Þ G-101	Þ G-102	Þ G-103	Þ G-109
Hitastig (°C)	97,4	97,8	98,5	98,5
Gasstyrkur í gufu (mmól/kg)				
CO ₂	71,3	160	110	108
H ₂ S	15,1	48,4	29,6	30,8
H ₂	5,13	53,8	17,1	9,48
CH ₄	0,067	0,844	0,415	0,546
N ₂	1,00	2,27	1,83	2,36
O ₂	0,02	<0,01	<0,01	<0,01
Ar	0,015	0,040	0,029	0,046
Steinefni í þéttivatni (mg/kg)				
B	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
Cl	0,08	0,06	0,08	0,09
Na	0,028	0,025	0,020	0,022
Samsætur í þéttivatni (‰SMOW)				
δ ¹⁸ O	-14,12	-12,20	-16,57	-18,11
δD	-111,1	-120,5	-114,8	-118,3



Mynd 7. Gasstyrkur í gufu og samsætuhlutföll í þéttivatni úr gufuaugum á Þeistareykjum 2012–2021. Sumarið 2021 var sýnum safnað úr G-101 við sæluhúsið, G-102 í Ketilfjalli, G-103 við Tjarnarás og G-109 á Röndum.

Tafla 3. Reiknaður efnahiti ($^{\circ}\text{C}$) sýna úr gufuaugunum fjórum og skyldum stöðum á Þeistareykjum. Notast er við kvarðanir Stefáns Arnórssonar o.fl. (1998). Tölum í sviga er sleppt við útreikninga á meðaltali (\bar{x}) og staðalfrávikni (σ).

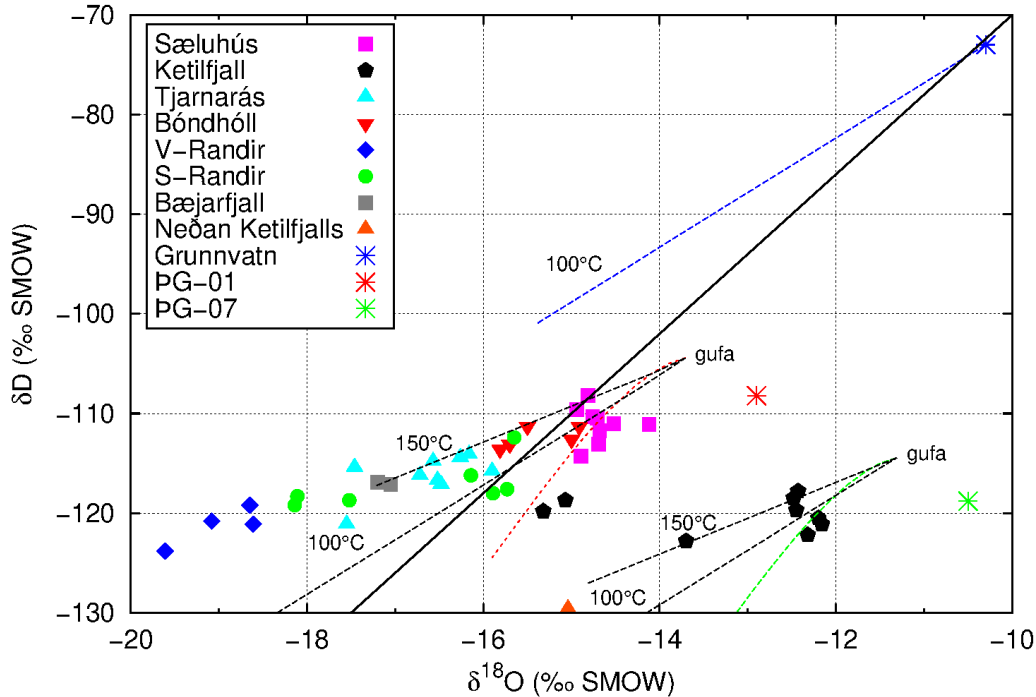
Sýni	Auga	T _{CO2}	T _{H2S}	T _{H2}	T _{CO2/N2}	T _{H2S/Ar}	T _{H2/Ar}	\bar{x}	σ
20210276	G-101	282	262	272	301	302	284	284	15
20190181	G-101	289	271	316	327	311	309	304	20
20180181	G-101	282	268	257	317	318	282	287	25
20170176	G-101	300	281	313	316	318	306	306	14
20160245	G-101	285	275	(248)	310	311	306	289	20
20150247	G-101	280	287	(332)	301	313	308	298	14
20140266	G-101	293	282	(344)	300	302	308	297	10
20130253	G-101	285	280	(332)	310	287	294	291	12
20120182	G-101	284	280	(325)	293	309	306	294	13
20210279	G-102	325	303	(376)	300	307	312	309	10
20190184	G-102	324	301	(359)	297	304	304	306	10
20180177	G-102	331	304	(370)	297	300	304	307	14
20170175	G-102	330	306	(375)	300	306	309	310	11
20160244	G-102	327	305	(376)	296	301	306	307	12
20150248	G-102	328	314	(383)	293	307	307	310	13
20140265	G-102	(409)	(339)	(482)	280	294	312	296	16
20130251	G-102	341	313	(398)	292	286	298	306	22
20120183	G-102	329	307	(394)	283	302	312	307	16
20210278	G-103	304	285	318	294	302	295	300	11
20190182	G-103	307	287	318	294	299	292	300	11
20180180	G-103	300	289	320	292	304	295	300	11
20170177	G-107	314	290	(345)	299	300	302	301	9
20160246	G-107	(353)	(310)	(398)	297	296	306	300	6
20150250	G-107	303	291	(346)	294	306	306	300	7
20140267	G-103	322	300	321	280	289	279	299	19
20130254	G-103	313	298	323	(239)	(263)	(262)	312	13
20120184	G-103	304	294	312	295	315	296	303	9
20210277	G-109	303	287	294	283	290	274	288	10
20190183	G-109	(338)	(303)	(324)	278	281	273	277	4
20180179	G-109	274	265	266	287	290	271	276	11
20160247	G-106	287	269	(310)	283	286	290	283	8
20150252	G-106	285	277	(301)	279	291	283	283	5
20130256	G-106	272	261	280	288	283	276	277	9
20120187	G-106	274	263	285	285	296	287	282	11

Þ G-101: Framan af var styrkur flestra gastegunda í auga G-101 við sæluhúsið á svipuðu róli og þegar fyrstu sýnum var safnað 1981 en frá 2018 hafa nokkrar breytingar sést. Nú mælist CO₂-styrkur 71 mmól/kg, styrkur H₂S 15 mmól/kg og styrkur H₂ um 5 mmól/kg. Greinilegt er að styrkur H₂S hefur farið smám saman lækkandi, úr 25–30 mmól/kg á árunum 2012–2017. Svipaða sögu, þó ekki eins afgerandi, má segja af styrk H₂, sem var á bilinu 20–30 mmól/kg fram til 2015. Styrkur CO₂ er hins vegar á svipuðu róli og áður. Meðalgashiti reiknast því heldur lægri en oft áður, um 284°C, en flest sýni frá 2012 hafa gefið gashita 290–300°C. Ágætt samræmi er milli flestra gashitamælanna en CO₂/N₂- og H₂S/Ar-hitamælarnir gefa þó heldur hærri gildi en hinir. Svólítill lækkun á tvívætnishlutfallinu frá 2018 er að mestu leyti gengin til baka og hugsanlega má greina svolitla hækkun á hlutfalli súrefnis-18.

Þ G-102: Gasstyrkur sýna sem safnað hefur verið úr G-102 í Ketilfjalli frá 2012 hefur verið fremur svipaður, að undanskildu sýni ársins 2014 en það hafði þést að nokkru leyti á leið sinni til yfirborðs og sá þess greinileg merki í gas- og samsætuniðurstöðunum. Gasstyrkur í sýni ársins 2019 var í lægri kantinum en sýnið frá 2021 er líkara fyrri sýnum. Styrkur CO₂ í sýninu mælist 160 mmól/kg, H₂S 48 mmól/kg og H₂ 54 mmól/kg. Vætnisstyrkur hefur frekar farið lækkandi síðan 2014 en réttir nú úr kútnum. Styrkur H₂ er þó enn hærri en jafnvægi við steindir gefur til kynna sem bendir til þess að herra hitastig gæti verið að finna neðar í kerfinu. Af þessum sökum reiknast óeðlilega hár H₂-gashiti, eða um 380°C. Meðalgashiti að H₂-mælinum slepptum reiknast 310°C sem er svipað og verið hefur. Gufan úr G-102 sker sig úr á gufuaugunum á Þeistareykjum hvað varðar súrefnishliðrun, sem er dæmigert um 4‰ í G-102 en óveruleg eða neikvæð í öðrum gufuaugum. Þetta bendir til þess að vökvinn sem gufan sýður upp af hafi haft umtalsverð efnaskipti við berg. Athyglisvert er að í sýnunum frá 2018 og 2019 virðist gufan innihalda mun minna af ¹⁸O en áður (þ.e. hefur neikvæðara δ¹⁸O og fellur hún því nær sýnum frá Þeistareykjagrundum (mynd 8). Þessi tvö ár var sýnum safnað úr gufuauga sunnan til í skálinni en árið 2021 var sýninu aftur safnað úr nyrðra auganu og þá fóru súrefnis-samsætugildi aftur til fyrra horfs.

Þ G-103: Gasstyrkur í Tjarnarási (augu G-103 og G-107) er svólítið hærri en á Þeistareykjagrundum (sbr. G-101 og G-104) og hefur verið fremur stöðugur undanfarin ár, að sýninu frá 2016 undanskildu en það hafði þést á leið til yfirborðs. Styrkur CO₂ mælist nú 110 mmól/kg en H₂S og H₂ mælast um 30 og 17 mmól/kg, sem allt er svipað og árið 2019. Gashitagildum ber ágætlega saman og reiknast meðalgashiti 300°C, sem ber prýðilega saman við síðustu ár (að teknu tilliti til þéttingar sýnisins frá 2016). Samsætuhlutföllin breytast fremur lítið milli ára; δD mælist nú um -115‰ og sýnið hefur svolitla neikvæða hliðrun frá úrkomulínunni.

Þ G-109: Sýni ársins 2019 úr G-109 á sunnanverðum Röndum hafði greinilega orðið fyrir nokkurri gufupéttingu á leið til yfirborðs. Samanburður við sýnið frá 2018 bendir til þess að hið sama sé hugsanlega uppi á teningnum fyrir sýnið frá 2021 en ekki í jafnmiklum mæli. Nú mælist styrkur CO₂ 109 mmól/kg, H₂S 31 mmól/kg og H₂ um 9,5 mmól/kg – sem allt eru u.þ.b. tvöfalt hærri tölur en fyrir sýnið frá 2018 og eldri sýni úr nágrannanum G-106. Hið sama má segja um hinar gastegundirnar; CH₄, N₂ og Ar. Fyrir vikið reiknast gashiti byggður á styrk þessara gasa, einkum CO₂, heldur hærri en áður og meðaltalið reiknast 288°C. Áhrif gufupéttingar má sömuleiðis sjá í samsætugildum en greinilegt er að sýnið frá 2019 var mun léttara en sýnið frá 2018 en það gekk að nokkru leyti til baka í sýninu 2021.



Mynd 8. Samsætuvið sýna áráanna 2012–2021 úr gufuaugum á Þeistareykjum ásamt úrkomulínu Craigs (1961). Einnig eru sýndir ferlar fyrir suðu grunnvatns við 100°C (blár), gufu sem myndast við þrýstifallssuðu djúpvatns úr PG-1 (rauður) og PG-7 (grænn), svo og þéttingu frumguflu úr PG-1 og PG-7 við 100°C og 150°C (svartir).

2.1.3 Söguleg samantekt

Talsverðar breytingar urðu á virkni og gassamsetningu í gufuaugum á Þeistareykjum á 10. áratug síðustu aldar, eins og Halldór Ármannsson (2004) hefur rakið. Síðan 2012 hafa hins vegar ekki sést verulegar breytingar milli ára, þótt stöku sýni skeri sig úr, vegna þéttingar guflu eða loftmengunar. Þó er rétt að benda á að styrkur H_2S og H_2 hefur farið nokkuð samfellt lækkandi í G-101 við sæluhúsið síðan 2017 eða jafnvel 2015. Það kann að benda til kælingar í kerfinu og gæti mögulega tengst holuprófunum og síðar vinnslu úr holum í nágrenninu, einkum á borteig A. Styrkur H_2 í G-102 í Ketilfjalli hefur heldur farið lækkandi með árunum en réttir aðeins úr kútnum í sýninu frá 2021.

Sjá má á gassamsetningunni, einkum styrk H_2 og N_2 , að svæðið í Röndum, þar sem gufuauga G-109 er og G-106 var, reiknast heldur kaldara en hin svæðin, eða um 250–280°C, samanborið við 300°C í Tjarnarási (auga G-103) og á Þeistareykjagrundum (auga G-101) og um 310°C í Ketilfjalli (G-102). Styrkur vetnis í gufunni er almennt frekar hár á austanverðu svæðinu, hærri en sem nemur jafnvægi við steindir í djúpkerfinu. Þetta á einkum við um Ketilfjall en einnig sum sýni frá Þeistareykjagrundum. Þó hefur vetnisstyrkur við sæluhúsið lækkað nokkuð síðan 2015. Þessi háí vetnisstyrkur bendir til djúpgufu í kerfinu, þ.e. að vökvinn í jarðhitageyminum sé tvífasa, og bendir til nálægðar við uppstreymi. Í Tjarnarási og á Röndum fellur vetnishiti hins vegar ágætlega saman við aðra gashitamæla.

Styrkur Cl og Na í þéttivatni er lægri en 0,1 mg/kg í öllum sýnum og styrkur B er lægri en 0,004 mg/kg. Þetta bendir til þess að lítil kvikuáhrif eða meðburður vatns sé til staðar.

Tvívetnisgildi gufunnar í sýnum frá árunum 2012 til 2021 spanna bilið -108 til -130‰ en allra lægstu gildin eru fyrir sýni sem greinilega hafa þést á leið til yfirborðs (úr G-105, G-102, G-103, G-109 og G-110 – sýni sem jafnframt hafa óvenju lágt $\delta^{18}\text{O}$). Tvívetnisgildin eru almennt hæst á Þeistareykjagrundum (G-101 og G-104) en lægst í Ketilfjalli (G-102).

Sýni frá Þeistareykjagrundum og óþétt sýni frá sunnanverðum Röndum falla á úrkomulínuna, sýni úr Ketilfjalli hafa jákvæða súrefnishliðrun en sýni úr Tjarnarási, Bæjarfjalli og vestanverðum Röndum sýna neikvæða súrefnishliðrun (mynd 8). Það töldu Darling og Ármannsson (1989) til marks um að gufan í Ketilfjalli væri hér um bil ótrufluð djúpgufa en að gufa vestan Tjarnaráss hefði þést verulega (niður í 15–25% af upphaflegu rúmmáli) við hitastig nærri eða neðan 200°C. Þetta kemur ágætlega heim og saman við niðurstöður borana og sýnatöku úr holum ÞG-2 og ÞG-5 sem gefa til kynna mikla lekt og um 200°C heitt vatnskerfi vestan Tjarnaráss (Ásgrímur Guðmundsson o.fl., 2008). Athygli vekur að sýni árunna 2018 og 2019 úr G-102 sýna miklu minni súrefnishliðrun en eldri sýni og falla nær sýnum af Þeistareykjagrundum en eldri sýni og sýnið frá 2021 (mynd 8). Rétt er að minna á að þessi tvö ár var sýnum safnað úr suðurhluta skálarinnar í Ketilfjalli en ekki norðurhluta líkt og flest undangengin ár og bendir það til þess að kerfisbundinn munur sé á gufunni úr þessum tveimur sýnatökustöðum þótt aðeins örfáir metrar skilji þá að. Sýnið sem safnað var úr G-110 árið 2019 virðist vera sömu ættar og gufan í nyrðra auganu en hafa þést verulega fyrir söfnun.

Varðandi uppruna vatnsins bendir tvívetni ótvírætt til þess að hans sé ekki að leita í köldu eða volgu grunnvatni nærri yfirborði, þar eð það hefur mun hærra tvívetnishlutfall en jarðhitavökvinn. Þannig eru samsætuhlutföll vatnsins úr vatnsbóli Þeistareykja undir Ketilfjalli $\delta\text{D} \approx -71,5\%$ og $\delta^{18}\text{O} \approx -10,3\%$ (sjá töflu 18 í kafla 3.2) en samsætuhlutföll djúpvatns í holu ÞG-1 eru $\delta\text{D} \approx -108\%$ og $\delta^{18}\text{O} \approx -12,7\%$, og djúpvatn í holu ÞG-7 hefur $\delta\text{D} \approx -119\%$ og $\delta^{18}\text{O} \approx -10,5\%$ (Finnbogi Óskarsson, 2019). Þessir gagnapunktur eru sýndir á mynd 8 og þar eru jafnframt sýnd með blárri, slitróttu línu samsætuhlutföll gufu sem myndast við suðu vatnsins úr vatnsbólunni við 100°C, reiknuð út frá jöfnum Horita og Wesolowski (1994).

Hins vegar má hugsa sér að tvívetnisgildi vatnsins sem fæðir jarðhitakerfið sé á bilinu -110 til -105‰ og að gufan sem stígur upp af Þeistareykjagrundum, Tjarnarási og Röndum sé mynduð við suðu slíks vökva, sem gæti verið sami vökvi og finnst í holu ÞG-1. Gufan í nyrðra auganu í skálinni í Ketilfjalli virðist hins vegar vera sömu ættar og vökvinn í holu ÞG-7 og gæti verið mynduð við suðu á honum. Á mynd 8 eru sýnd samsætuhlutföll gufu sem myndast við suðu djúpvatns úr ÞG-1 (rauður ferill) og ÞG-7 (grænn ferill) frá djúphita niður í 100°C, auk þéttingar frumgufunnar sem myndast við suðu holuvökvans, annars vegar við 100°C og hins vegar 150°C, allt reiknað út frá jöfnum Horita og Wesolowski (1994).

2.2 Krafla

2.2.1 Sýnatökustaðir

Þremur gufusýnum var safnað í Kröflu 12. ágúst í sól og sumaryl. Yfirlit um sýnatökustaði er í töflu 4 og staðsetning þeirra sýnd á mynd 9 ásamt öðrum gufuaugum í Kröflu sem sýni hafa verið tekin úr (Gestur Gíslason o.fl., 1978; Halldór Ármannsson og Trausti Hauksson, 1980; Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson, 2011; Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2013a, 2013b, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018; Finnbogi Óskarsson o.fl., 2019).

Sýnum var safnað úr þremur gufuaugnanna sem oftast hefur verið safnað úr undanfarin sumur; G-104 í hlíðum Leirhnjúks, G-107 í gígskál norðan Vítis og G-106 í gili fyrir neðan holu K-14. Sýnatöku- og efnagreiningaraðferðum er lýst í viðauka aftast í skýrslunni.

Sýnatökustöðunum þremur sem safnað var úr 2021 er lýst nánar hér á eftir. Í gagnagrunni ÍSOR eru sýnatökuaugu árána 2012 til 2021 í Kröflu kölluð „K G-101“ og svo framvegis til að forðast rugling við gufuaugu á öðrum svæðum en í texta og á myndum hér á eftir eru nöfn gufuaugna víða styttn í „G-101“ til einföldunar.

Tafla 4. Sýnatökustaðir í Kröflu sumarið 2021.

Nafn auga*	Staðar-númer	Eldri sýni**	x-hnit	y-hnit	Hæð (m y.s.)	Lýsing
G-104	H 10198	G-13	601488	581921	572	Í flagi í austurhlíð Leirhnjúks
G-106	H 10200	G-7	603204	580399	541	Ofarlega í gili neðan við K-14
G-107	H 93514	G-1	603252	582046	589	Í gígskál norðan Vítis

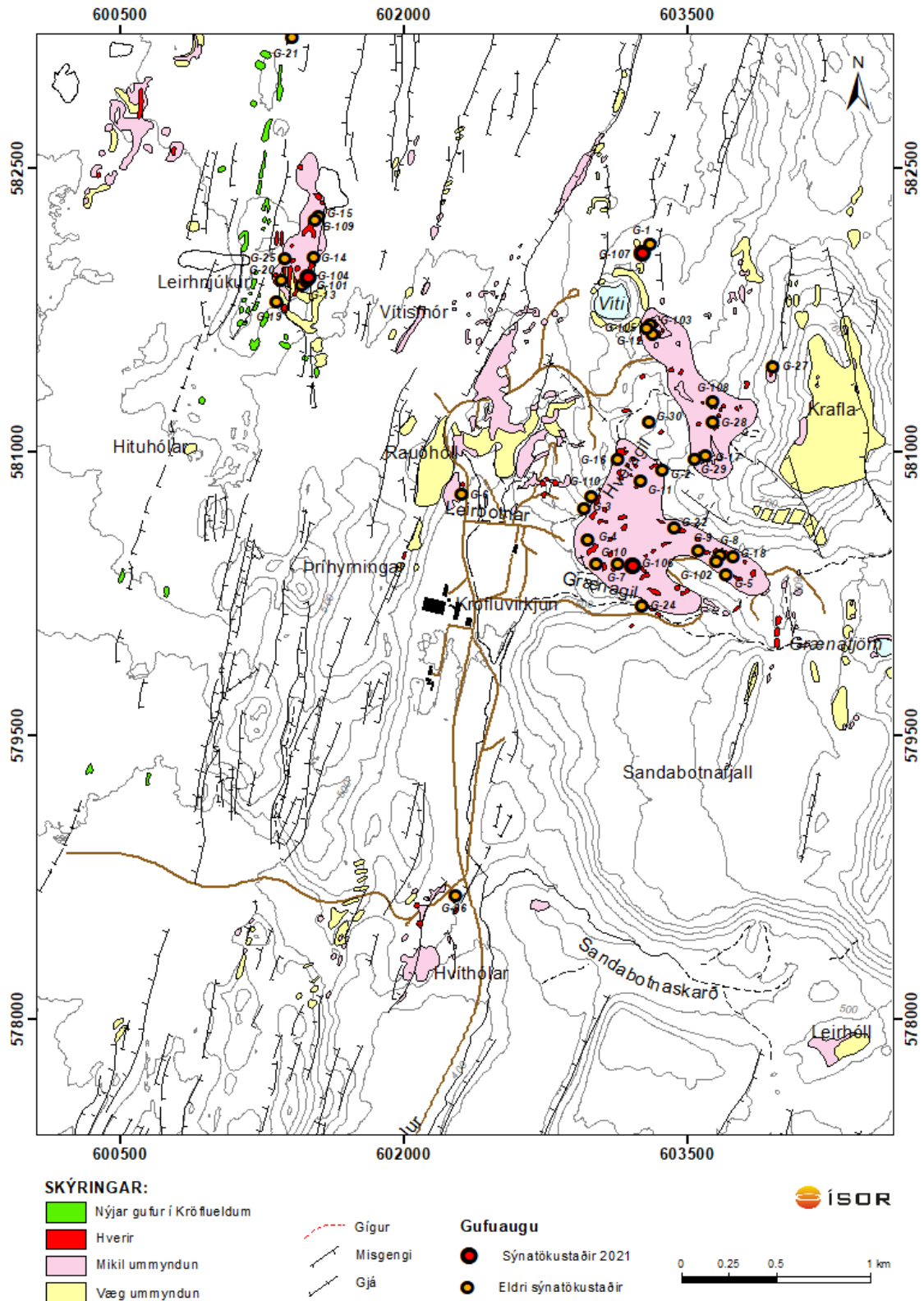
* Nöfn gufuaugna eru styttn. Fullt nafn í gagnagrunni ÍSOR er „K G-104“ o.s.frv.

** Hér er vísað til gufuaugna sem lýst er í skýrslum Gests Gíslasonar o.fl. (1978), Halldórs Ármannssonar og Trausta Haukssonar (1980), Trausta Haukssonar og Jóns Benjamínssonar (2011).

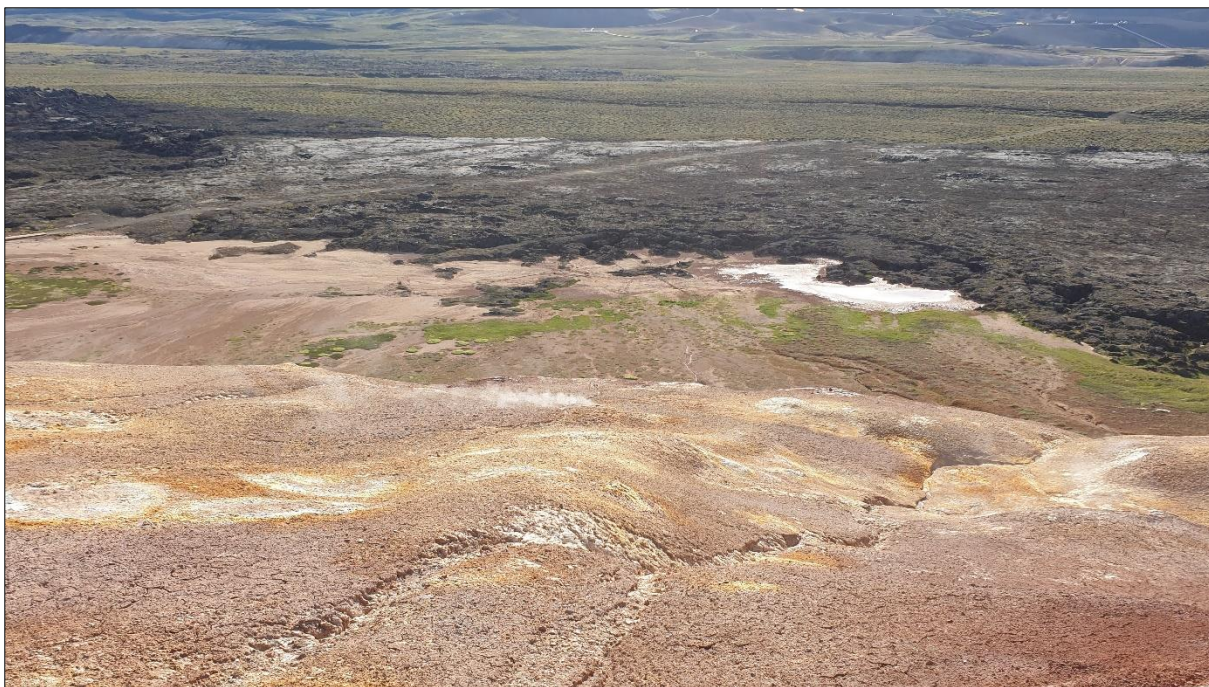
K G-104: Öflugt gufuauga ofarlega í stóru leirflagi í austurhlíð Leirhnjúks (myndir 9 og 10). Þetta auga er hið neðsta þriggja álitalegra gufuaugna á hrygg utan í leirskellu þar sem virkni var umtalsverð. Augað er talið vera á sömu slóðum og hið forna G-13, svo og auga G-101 sem safnað var úr árið 2012. Talsverð virkni var í flaginu og eflaust gnótt góðra sýnatökustaða, þótt erfitt væri að sjá það vegna veðurs.

K G-106: Kröftugt gufuauga í neðri hluta allstórrar leirskellu ofarlega í gili sem liggur niður frá holu K-14. Augað er nærri gamla G-7 (myndir 9 og 11). Fleiri álitleg augu voru í þessari skellu en aðgengi var sýnu þægilegast að þessu. Einnig var nokkur virkni neðar í gilinu. Virkni í kringum augað er svipuð og undanfarin ár en skellan er orðin nokkuð sundursoðin og farin að mynda skýrari stall en áður.

K G-107: Nokkur gufuvirkni er í brúnum beggja skálanna norðan Vítis, mest þó í norðurbrún þeirrar dýpri þar sem allnokkur kröftug gufuaugu eru í sömu leirskellunni, á sömu slóðum og G-1 mun hafa verið. Augað sem varð fyrir valinu að þessu sinni er austarlega í skellunni allkröftugt, vel fókuserað og aðgengilegt (myndir 9 og 12), á nokkurn veginn sama stað og safnað var árin 2017 og 2019.



Mynd 9. Gufuaugu í Kröflu. Gufuaugu sem safnað var úr sumarið 2021 eru sýnd með rauðum táknum.



Mynd 10. Gufuaugað K G-104 í austurhlíð Leirhnjúks.



Mynd 11. Undirbúningur gufusýnatöku úr gufuauganu K G-106 í gili vestan við holu K-14.



Mynd 12. Sýnataka úr gufuauganu K G-107 í gígskál norðan Vítis.

2.2.2 Niðurstöður gufuefnagreininga

Niðurstöður efnagreininga sýna sem tekin voru á Kröflusvæðinu sumarið 2021 eru skráðar í töflu 5 og teiknaðar á mynd 13 ásamt efnasamsetningu eldri sýna úr gufuaugunum G-104, G-106 og G-107. Á myndinni eru einnig sýnd gögn frá öðrum augum á sömu slóðum úr gagnagrunni ÍSOR. Þar er um að ræða gufuaugun G-101 og G-109 í Leirhnjúki, G-102 í Suðurhlíðum, G-103 við Tvíburavötn austan Vítis, G-108 í Vesturhlíðum og G-110 í Hveragili. Samsætuvik í sýnum sem safnað hefur verið síðan 2012 er teiknað á mynd 14, ásamt úrkomulínu Craigs (1961).

Í töflu 6 er sýndur reiknaður djúphiti út frá mældum styrk hinna ýmsu gastegunda. Notast er við kvarðanir Stefáns Arnórssonar o.fl. (1998) sem reiknaðar eru út frá ætluðu jafnvægi við steindafylkin klínózóisít-kalsít-kvars-prehnít (CO_2) og pýrít-pýrrhótít-prehnít-epidót (H_2S og H_2). Fyrir Vítissvæði, Vesturhlíðar og Suðurhlíðar er notuð sú kvörðun CO_2 -hitamælisins sem gerir ráð fyrir talsverðu CO_2 -flæði frá kviku, þrátt fyrir að það hafi dregist saman miðað við árin um og eftir Kröfluelda. Þessi kvörðun CO_2 -hitamælisins á síður við um Leirhnjúkssvæðið enda komu áhrif kvikugass hraðar fram þar og dofnuðu jafnframt hraðar og fyrir sýni úr Leirhnjúk er því hér notast við þá kvörðun gashitamælisins sem gerir ekki ráð fyrir miklu CO_2 -flæði frá kviku.

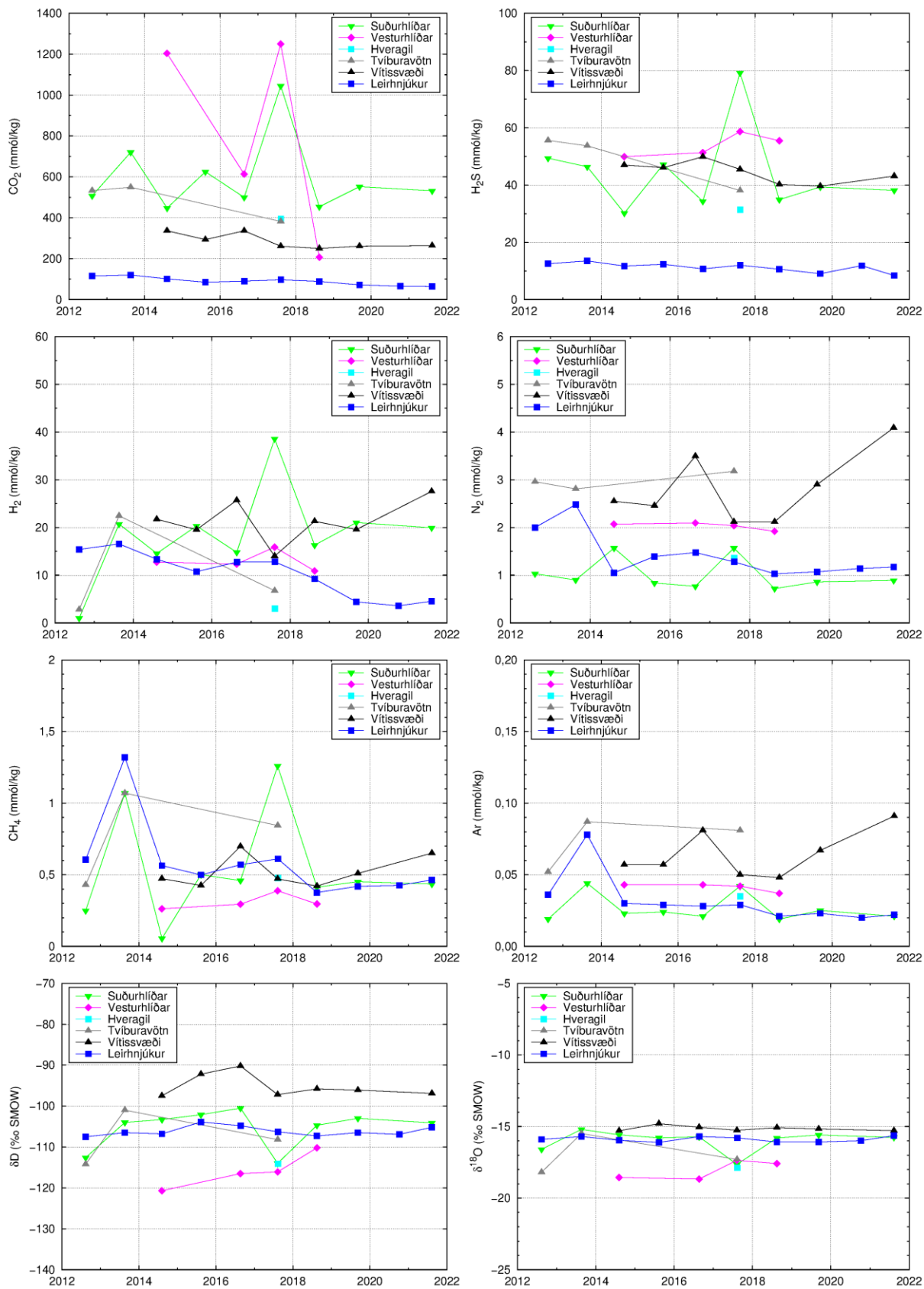
Tafla 5. Efnasamsetning gufusýna úr Kröflu sumarið 2021.

Sýni	20210280	20210282	20210281
Dagsetning	12.08.21	12.08.21	12.08.21
Staður	K G-104	K G-106	K G-107
Hitastig (°C)	97,3	97,4	97,3
Gasstyrkur í gufu (mmól/kg)			
CO ₂	63,6	532	264
H ₂ S	8,39	38,1	43,1
H ₂	4,55	20,0	27,6
CH ₄	0,464	0,435	0,651
N ₂	1,17	0,89	4,09
O ₂	<0,01	<0,01	<0,01
Ar	0,022	0,021	0,091
Steinefni í þéttivatni (mg/kg)			
B	<0,004	<0,004	<0,004
Cl	0,09	0,03	0,07
Na	0,032	0,024	0,029
Samsætur í þéttivatni (%SMOW)			
δ ¹⁸ O	-15,64	-15,76	-15,29
δD	-105,2	-104,1	-96,9

K G-104: Styrkur CO₂ og H₂S hefur jafnan verið mun lægri í Leirhnjúki en í hlíðum Kröflu og svo er enn (heildargasstyrkur í nýjasta sýninu úr austurhlíð Leirhnjúks er 78,2 mmól/kg samanborið við 591 og 339 mmól/kg í gufuaugunum í Suðurhlíðum og við Víti). Gasstyrkur í sýnum úr Leirhnjúki hefur raunar farið heldur lækkandi allar götur frá lokum Kröfluelda en nokkuð skýr skil má sjá frá árinu 2019 að telja, ekki síst í styrk H₂. Styrkur CO₂ mælist nú 64 mmól/kg, H₂S mælist 8,4 mmól/kg og H₂ 4,6 mmól/kg. Styrkur CH₄, N₂ og Ar er svipaður og fyrri ár. Reiknaður meðalgashiti fyrir sýnið frá árinu 2021 er 276°C (að H₂S-hitamælinum slepptum) sem er svipað og árin 2019 og 2020 en um 10–15°C lægra en gashiti áranna þar á undan.

K G-106: Gasstyrkur í auga G-106 í Suðurhlíðum mælist um 591 mmól/kg sem er svolítið herra en flest undangengin ár (að sýni ársins 2017 undanskildu en það hafði orðið gufupéttingu að bráð). Styrkur CO₂ er hæstur 532 mmól/kg en þar á eftir koma H₂S 38 mmól/kg og H₂ 20 mmól/kg. Samsætugildi fyrir sýni ársins 2021 eru á svipuðu róli og vant er. Meðalefnahiti fyrir nýjasta sýnið reiknast 315°C sem er sama gildi og 2019 en hefur oftast nær verið svolítið lægra; um 310°C. Í meðaltalinu er H₂-mælinum alla jafna sleppt þar sem hann gefur ótrúlega hátt gildi (>400°C).

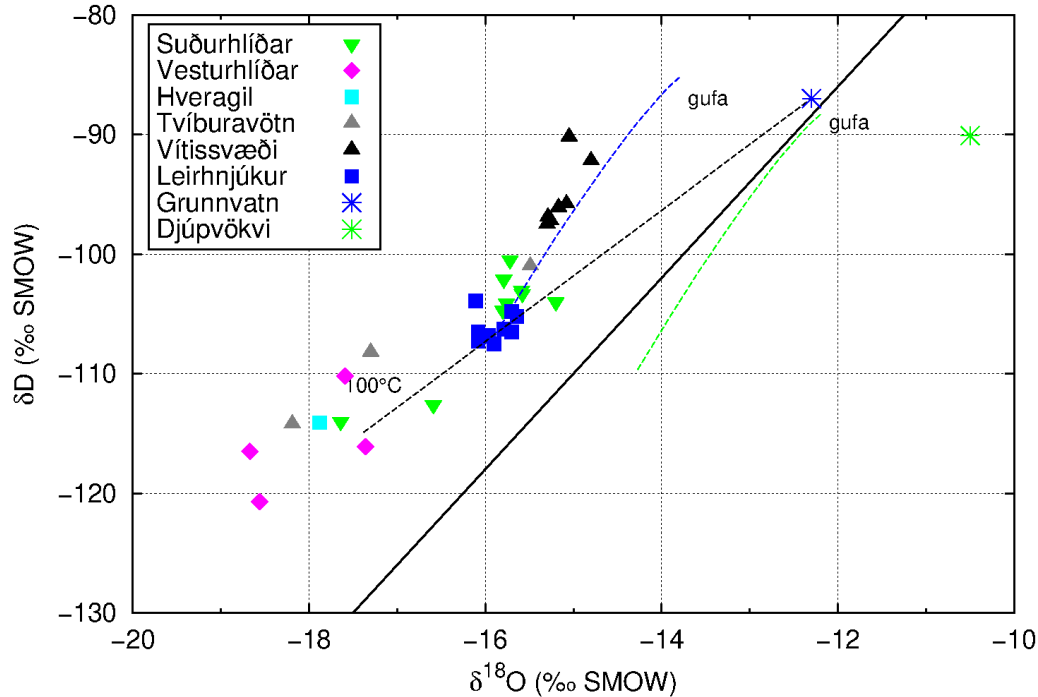
K G-107: Svo virðist sem áhrif kvikugass í Kröflueldum hafi verið mest á Vítissvæðinu og þar hefur styrkur CO₂ lengst af verið hæstur þótt nú mælist gasstyrkur hærri í Suður- og Vesturhlíðum. Heildargasstyrkur í sýni ársins mældist 339 mmól/kg sem er svolítið herra en undanfarin ár. Þar af var CO₂ 264 mmól/kg, H₂S 43 mmól/kg og H₂ 28 mmól/kg. Athygli vekur að styrkur N₂ og Ar hækkar mjög en minni hækkun sést fyrir H₂S, H₂ og CH₄. Ástæða þess gæti verið gufupétting eða að lútur hafi tapast úr flöskunni. Gashitamælar gefa meðaltalið 299°C fyrir sýnið frá 2021 en það er á svipuðu róli og fyrri ár. Rétt er að benda á gildið fyrir H₂-hitamælinn (340°C) sker sig úr. Sé því sleppt lækkar meðalgashitinn í 291°C.



Mynd 13. Gasstyrkur í gufu og samsætuhlutföll í þéttivatni úr gufuaugum í Kröflu 2012–2021. Sumarið 2021 var sýnum safnað úr G-104 í Leirhnjúki, G-106 í Suðurhlíðum og G-107 norðan Vítis.

Tafla 6. Reiknaður efnahiti ($^{\circ}\text{C}$) sýna úr gufuaugunum þremur og skyldum sýnatökustöðum á Kröflu-svæðinu. Notast er við kvarðanir Stefáns Arnórssonar o.fl. (1998). Tölum í sviga er sleppt við útreikninga á meðaltali (\bar{x}) og staðalfrávik (σ).

Sýni	Auga	T _{CO2}	T _{H2S}	T _{H2}	T _{CO2/N2}	T _{H2S/Ar}	T _{H2/Ar}	\bar{x}	σ
20210280	G-104	276	(243)	268	290	274	273	276	8
20200201	G-104	278	(254)	261	292	285	270	277	12
20190177	G-104	282	(245)	267	298	275	272	279	12
20180183	G-104	293	(250)	293	308	281	289	293	10
20170171	G-104	297	(255)	305	303	276	289	294	12
20160248	G-104	293	(251)	305	294	274	289	291	11
20150257	G-104	290	(255)	298	294	277	285	289	9
20140256	G-109	315	282	323	281	276	281	293	20
20140257	G-104	299	(254)	307	313	275	289	297	15
20130248	G-104	309	(259)	316	285	(253)	274	296	20
20120188	G-101	284	(256)	313	292	272	289	290	15
20210282	G-106	332	294	325	(404)	319	304	315	15
20190179	G-106	333	295	327	(408)	315	302	315	16
20180186	G-106	324	291	316	(407)	319	302	310	13
20170165	G-106	368	321	357	(411)	320	304	334	27
20160240	G-106	328	291	311	(409)	316	299	309	15
20150259	G-106	303	301	324	323	295	284	305	16
20140259	G-106	323	286	311	(364)	309	296	305	14
20130250	G-106	(347)	301	326	(422)	303	290	305	15
20140258	G-102	328	301	(228)	261	257	(199)	315	19
20120189	G-102	329	303	(227)	(393)	331	(247)	321	16
20210281	G-107	298	299	340	297	280	281	299	22
20190178	G-107	298	296	324	310	286	281	299	16
20180184	G-107	296	296	328	322	296	289	305	16
20170166	G-107	298	300	309	324	299	280	302	15
20160242	G-107	309	304	336	313	288	282	305	20
20150258	G-107	(340)	302	325	(417)	321	302	313	12
20140254	G-107	309	302	329	327	296	286	308	17



Mynd 14. Samsætuvið sýna áráanna 2012–2021 úr gufuaugum á Kröflusvæðinu ásamt úrkomulínu Craigs (1961). Einnig eru sýndir ferlar fyrir gufu myndaða við suðu grunnvatns við 100°C (svartur), svo og þrýstifallssuðu djúpvökva úr Kröflu (grænn) og gufuhitaðs grunnvatns (blár) frá 250°C í 100°C.

2.2.3 Söguleg samantekt

Gufan sem stígur upp af hlíðum Kröflu og Vítissvæðinu er mun gasríkari en gufan í Leirhnjúki. Samanlagður gasstyrkur í sýnum ársins er um 78 mmól/kg í Leirhnjúki, 339 mmól/kg við Víti og 591 mmól/kg í Suðurhlíðum. Gasstyrkur í gufu í Leirhnjúki hefur lækkað nokkuð greinilega síðan 2018 og lækkar nú enn. Þetta á einkum við um „jarðhitagösin“ CO₂, H₂S og H₂ en styrkur CH₄, N₂ og Ar helst fremur stöðugur milli ára. Eins og rakið hefur verið er sennilegasta skýring þessa sú að niðurdæling í holu K-35 hafi valdið staðbundinni kólnun jarðhitakerfisins undir Leirhnjúki (Finnbogi Óskarsson og Auður Agla Óladóttir, 2020).

Sögulega virðist gasstyrkur flökta meira í Suðurhlíðum en á hinum svæðunum. Styrkur Cl mælist nú alls staðar lægri en 0,1 mg/kg í þéttivatni en var iðulega hærri en 1 mg/kg á árunum um og eftir Kröfluelda (sjá t.d. samantekt hjá Jóni Benjamínssyni og Trausta Haukssyni, 1998). Styrkur B í þéttivatni mælist lægri en 0,004 mg/kg í öllum sýnum. Þetta gefur til kynna að lítilla kvikuáhrifa gæti í hveragufu nú um mundir. Styrkur Na í þéttivatni mælist sömuleiðis lágur (<0,05 mg/kg) og því lítill meðburður vatns í sýnunum.

Undanfarinn áratug hefur meðalgashiti reiknast 300–315°C í hlíðum Kröflu en heldur lægri í Leirhnjúki, um 290–295°C, en síðan 2019 hefur meðalgashiti í Leirhnjúki verið lægri en 280°C. Almenn þer gashitamælunum vel saman en helstu frávik eru að H₂S-hitamælarnir gefa lægri gildi en hinir hitamælarnir fyrir Leirhnjúkssýnin, og að CO₂-hitamælarnir hafa stundum gefið mjög há gildi (>340°C) í Suður- og Vesturhlíðum.

Samsætugildi í gufuaugum við Leirhnjúk eru býsna stöðug, með δD á bilinu -108 til -101‰ í flestum sýnum, og ekki er að sjá breytingu þar þótt gasinnihald gufunnar fari lækkandi. Flest sýnanna úr Suðurhlíðum hafa sömuleiðis verið á því bili, þó með tveimur undantekningum (2012 og 2017) þar sem sýnin mælast talsvert léttari, líklega vegna þéttingar gufu. Sýni úr Vesturhlíðum eru sömuleiðis snauð að tvívetni, almennt með $\delta D \leq -114$ ‰, en sýnin sem safnað er norðan Vítis eru áberandi þyngst, með $\delta D > -100$ ‰.

Eins og sjá má á mynd 14 liggja öll sýnin vinstra megin við úrkomulínuna, með súrefnishliðrun sem nemur 1–2‰ til vinstri frá línunni. Þetta gæti bent til þess að gufan sé mynduð við suðu á grunnvatni eða lítt hvörfuðum jarðhitavökva. Reiknaður djúpvökvi í Kröflukerfinu norðan Hvíthóla hefur δD á bilinu -94 til -87‰, að meðaltali -90,1‰ (Pope o.fl., 2016), almennt snauðari að tvívetni í Suðurhlíðum en í Leirbotnum þar sem gufan er tvívetnisríkari. Meðalsamsætugildi Pope o.fl. (2016) fyrir djúpvökvann eru sýnd með grænni stjörnu á mynd 14. Samsætugildi gufu sem myndast við suðu þessa djúpvökva frá 250°C í 100°C eru sýnd með grænni brotalínu á myndinni en ekkert sýnanna fellur sérlega nærri henni. Á myndinni eru jafnframt sýnd með blárri stjörnu samsætugildi fyrir grunnvatn frá Hágöngum norðan Kröflufjalls ($\delta D = -87,0$ ‰; $\delta^{18}O = -12,3$ ‰; frá Pope o.fl., 2016) og ferlar fyrir gufu sem myndast annars vegar við þrýstifallssuðu gufuhitaðs grunnvatns frá 250°C í 100°C (blá brotalína) og hins vegar við samfellda suðu gufuhitaðs grunnvatns við 100°C (svört brotalína). Suðuferlarnir eru reiknaðir út frá jöfnum Horita og Wesolowski (1994).

Af mynd 14 að dæma virðist sem gufa á Vítissvæðinu sé tilkomin við þrýstifallssuðu gufuhitaðs grunnvatns, gufan í Suðurhlíðum og Leirhnjúki gæti annaðhvort verið mynduð við slíka suðu eða soðin upp af grunnvatni sem sýður við 100°C. Sennilegast er að léttari gufa, t.d. í Vesturhlíðum, sé af sama meiði en að hluti gufunnar hafi þést nærri 100°C.

2.3 Námafjall

2.3.1 Sýnatökustaðir

Þremur gufusýnum var safnað á Námafjallssvæðinu 10. ágúst í hlýju, björtu og fallegu veðri. Fyrir vikið var stundum erfitt að koma auga á hveragufu. Sýnum var safnað úr þremur gufuaugum; G-105 í gili upp af holu B-9, G-106 vestan við H-9 á Hverum og G-109 á Námafjalli í virkninni vestan Syðstu-Kollu. Sýnatöku- og efnagreiningaraðferðum er lýst í viðauka aftast í skýrslunni.

Yfirlit um sýnatökustaði er í töflu 7 og staðsetning þeirra er sýnd á mynd 15 ásamt öðrum gufuaugum sem sýni hafa verið tekin úr í Námafjalli og Bjarnarflagi. Á mynd 15 eru eldri gufusýnatökustaðir á svæðinu auðkenndir með þrennum hætti; staðir merktir N-1 til N-20 og H-1 og H-2 eru sýnatökustaðir skilgreindir af Baldri Líndal (Jarðboranir ríkisins, 1951; Halldór Ármannsson, 1993), staðir merktir A til X eru sýnatökustaðir skilgreindir af Stefáni Arnórssyni og Herði Svavarssyni (1985) og loks eru tveir staðir merktir SA-1 og SA-2 en þar tóku Stefán Arnórsson o.fl. (1995; 1996) gufusýni. Stefán Arnórsson o.fl. (1995; 1996) tóku reyndar sýni á mun fleiri stöðum en þeir höfðu flestir verið skilgreindir í eldri rannsóknum.

Sýnatökustöðum ársins 2021 í Námafjalli er lýst frekar hér á eftir. Í gagnagrunni ÍSOR eru sýnatökuaugu frá árunum 2012 til 2021 í Námafjalli kölluð „N G-101“ og svo framvegis til að forðast rugling við gufuaugu á öðrum svæðum en í texta og á myndum hér á eftir eru nöfn gufuaugna víða stytt í „G-101“ til einföldunar.

Tafla 7. Sýnatökustaðir í Námafjalli sumarið 2021.

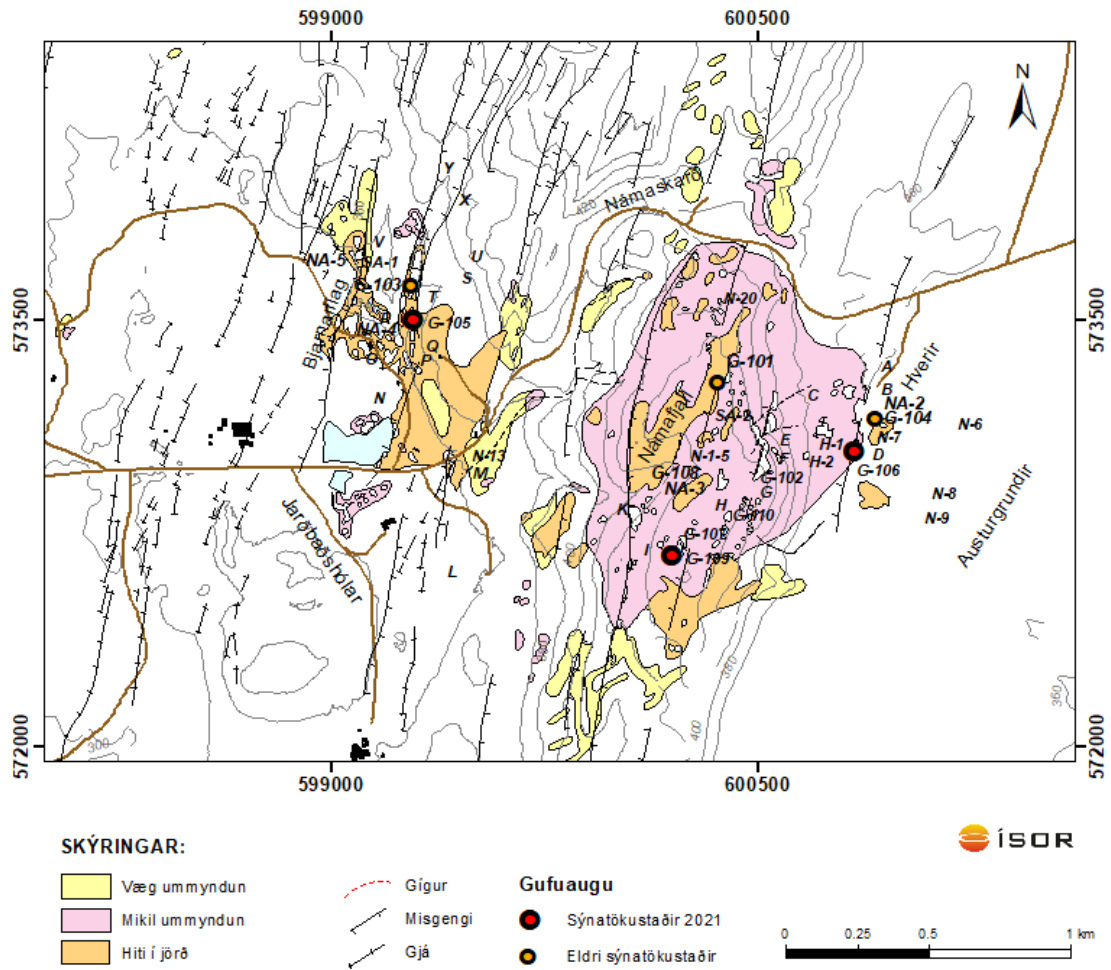
Nafn auga*	Staðarnúmer	x-hnit	y-hnit	Hæð (m y.s.)	Lýsing
G-105	H 93517	599285	573497	347	Í gili norður af holu B-9
G-106	H 93518	600837	573034	364	Vestan syðstu holunnar á Hverum
G-109	H 93570	600199	572672	482	Á hverasvæði vestan Syðstu-Kollu

* Nöfn gufuaugna eru stytt. Fullt nafn í gagnagrunni ÍSOR er „N G-101“ o.s.frv.

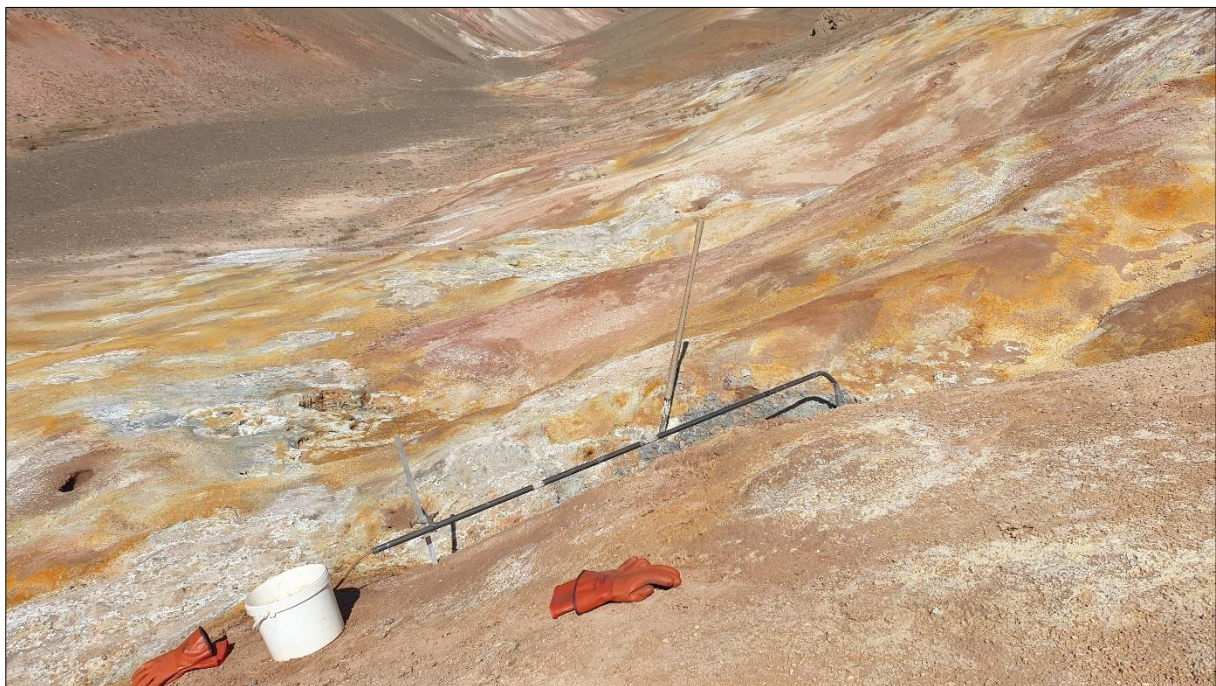
N G-105: Ágætlega kraftmikið gufuauga með fókuseruðu streymi framarlega í grunnu gili sem liggur norður frá holu B-9 í Bjarnarflagi (myndir 15 og 16). Talsverð virkni teygir sig upp eftir allri austurhlíð gilsins en vegna veðurs sást reyndar lítil gufa í hlíðinni að þessu sinni. Þetta auga er í fremstu ummyndunarskellunni.

N G-106: Mjög kröftugt gufuop í leirflagi vestan við syðstu borholuna á Hverum (H-9), rétt neðan við göngustíg. Sumrin 2014 og 2015 var sýnum safnað úr auga í miðju flaginu en opið sem safnað hefur verið úr síðan 2017 er svolítið vestar í flaginu (myndir 15 og 17).

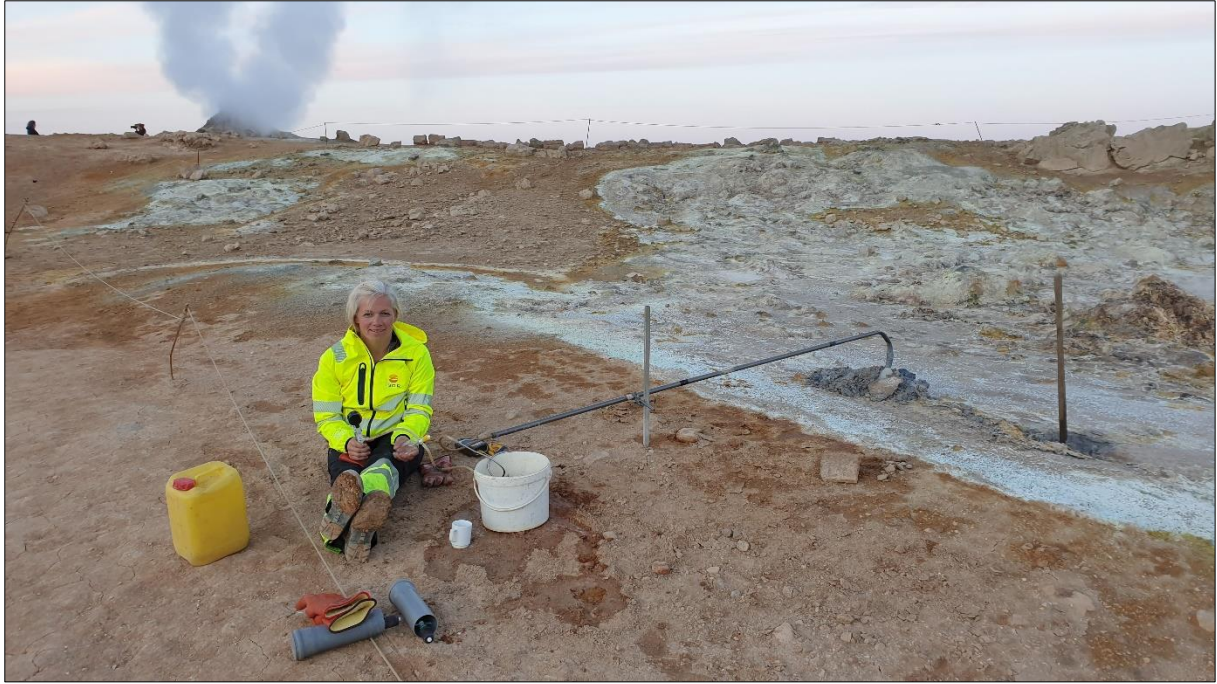
N G-109: Frekar öflugt gufustreymi úr hinni stærstu fjölmargra brennisteinsþúfna á nýja hverasvæðinu vestan Syðstu-Kollu sem Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (2009) lýstu fyrst (myndir 15 og 18).



Mynd 15. Gufuaugu í Námafjalli og Bjarnarflagi. Gufuaugu sem safnað var úr sumarið 2021 eru sýnd með rauðum táknum.



Mynd 16. Undirbúningur sýnatöku úr gufuauganu N G-105 í gili upp af holu B-9 í Bjarnarflagi.



Mynd 17. Sýnataka úr gufuauga N G-106 í flagi vestan holu H-9 á Hverum.



Mynd 18. Gufuaugað N G-109 á Námafjalli. Syðsta-Kolla í bakgrunni.

2.3.2 Niðurstöður gufuefnagreininga

Niðurstöður efnagreininga sýna sem tekin voru við Námafjall sumarið 2021 eru skráðar í töflu 8. Mynd 19 sýnir styrk CO₂, H₂S, H₂, N₂, CH₄ og Ar í gufuaugum á Námafjalli, Hverum og í Bjarnarflagi í tímans rás. Á myndunum fyrir N₂ og Ar er þeim sýnum sleppt sem eru greinilega umtalsvert menguð andrúmslofti þar eð styrkur andrúmsloftsgasanna í þeim sýnum er margfalt hærri en gengur og gerist í gufusýnum og skekkir því myndina verulega. Samsætuvið í sýnunum er teiknað á mynd 20 ásamt úrkomulínu Craigs (1961).

Í töflu 9 er sýndur reiknaður djúphiti út frá mældum styrk hinna ýmsu gastegunda í sýnum úr gufuaugunum þremur og skyldum sýnatökustöðum. Notast er við kvarðanir Stefáns Arnórssonar o.fl. (1998) sem reiknaðar eru út frá ætluðu jafnvægi við steindafylkin klínózóisít-kalsít-kvars-prehnít (CO₂) og pýrít-pýrrhótít-prehnít-epidót (H₂S og H₂). Fyrir Námafjall er notuð sú kvörðun CO₂-hitamælisins sem gerir ekki ráð fyrir miklu CO₂-flæði frá kviku.

Tafla 8. Efnasamsetning gufusýna frá Námafjallssvæðinu sumarið 2021.

Sýni	20210273	20210275	20210274
Dagsetning	10.08.2021	10.08.2021	10.08.2021
Staður	N G-105	N G-106	N G-109
Hitastig (°C)	98,3	98,5	98,2
Gasstyrkur í gufu (mmól/kg)			
CO ₂	9,88	149,7	121,6
H ₂ S	10,6	62,6	44,6
H ₂	1,25	81,4	65,81
CH ₄	1,03	0,502	0,562
N ₂	6,84	1,79	3,75
O ₂	<0,01	<0,01	<0,01
Ar	0,110	0,025	0,056
Steinefni í þéttivatni (mg/kg)			
B	<0,004	<0,004	<0,004
Cl	0,10	0,07	0,04
Na	0,032	0,081	0,055
Samsætur í þéttivatni (‰SMOW)			
δ ¹⁸ O	-17,80	-7,38	-10,66
δD	-123,7	-119,1	-111,8

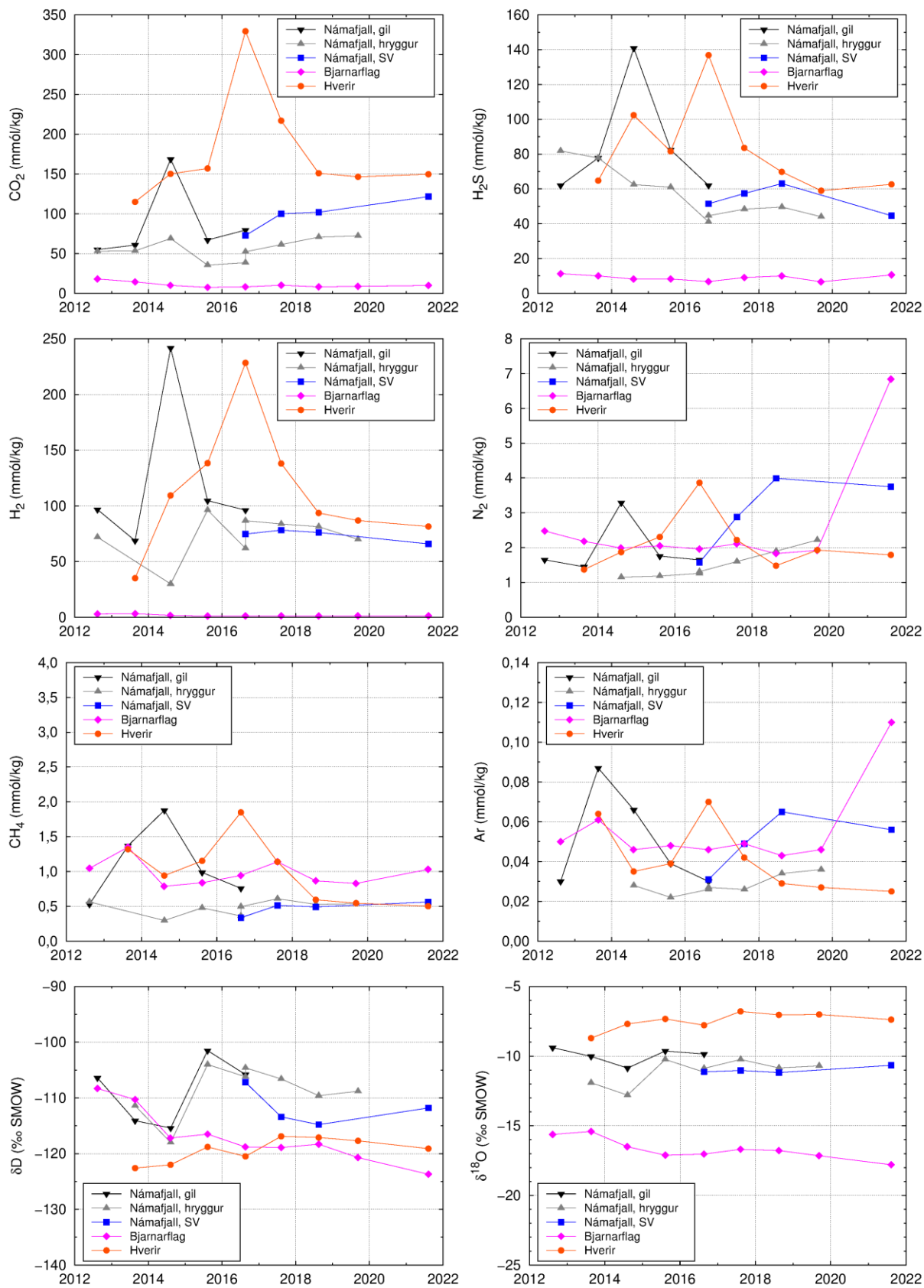
N G-105: Gasstyrkur í gílinu ofan B-9 er mjög lágur og hefur heldur lækkað með tímanum; hann var 36 mmól/kg árið 2012 en hefur verið 19–24 mmól/kg síðan 2014. Þessi lækking hefur einkum verið áberandi fyrir styrk „jarðhitagasanna“ CO₂, H₂S og H₂ en styrkur annarra gastegunda hefur breyst minna. Í sýni ársins 2021 hækkar styrkur allra gastegunda verulega, einnig styrkur N₂ og Ar sem hér um bil þrefaldast milli ára. Þetta bendir til þéttingar gufu og er því ástæða til að taka niðurstöðunum með fyrirvara. Efnahitamælum ber þó ágætlega saman, bæði innbyrðis og milli ára, og reiknast efnahiti að meðaltali 228°C í sýninu sem ber mjög vel saman við sýni ársins 2019. Gufan úr G-105 hafði δD ≈ -118‰ árin 2014–2018 en árin 2019 og 2021 hafa hlutföll þyngri samsætna lækkað, sem bendir til þéttingar gufu. Gufan úr G-103 í sama gili sem safnað var úr 2012 og 2013 var heldur ríkari að tvívetni (δD ≈ -110‰).

N G-106: Gufan úr G-106 er talsvert gasríkari en gufa úr öðrum sýnatökustöðum í Námafjalli; heildargasmagn er um 296 mmól/kg, þar af 82 mmól/kg af H₂. Þessi hái vetnisstyrkur bendir til þess að djúpgufa sé til staðar í kerfinu. CO₂ og H₂S hafa einnig háan styrk; 150 og 63 mmól/kg. Þetta eru svipuð gildi og undanfarin ár. Fyrir vikið reiknast meðalgashiti talsvert hár, eða 320°C, þótt þar sé sleppt gríðarháu gildi úr vetnishitamælinum. Tvívetnishlutfall gufunnar á Hverum er afar lágt ($\delta D \approx -118\%$) og gufan sýnir mikla súrefnishliðrun (um 9%; mynd 20) sem bendir til mikilla efnaskipta djúpvökvans við berg.

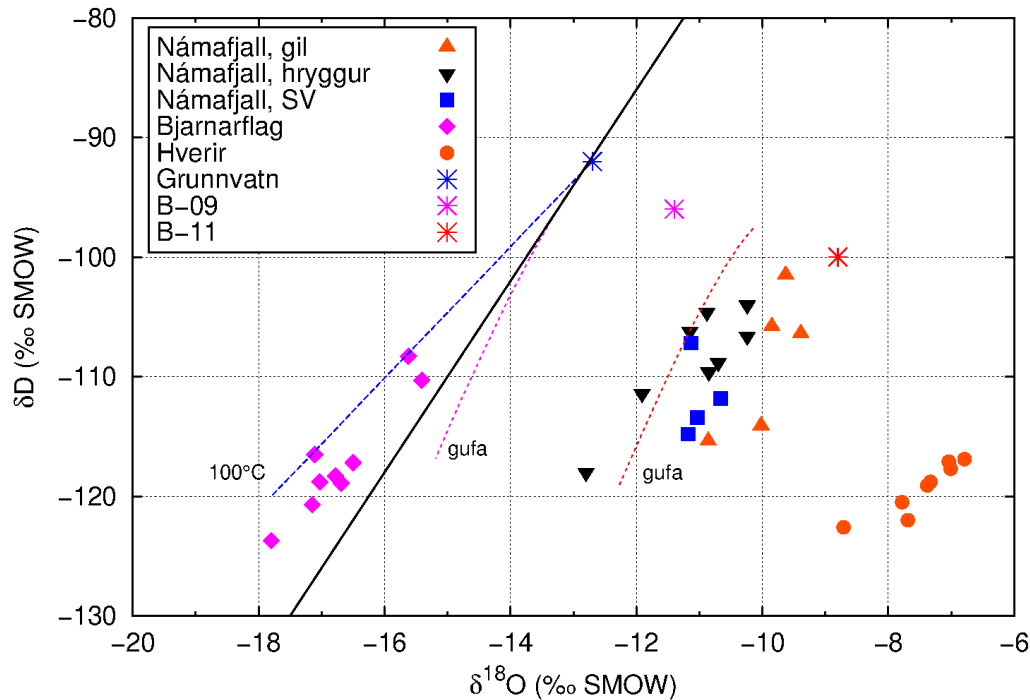
N G-109: Árið 2016 var sýnum í fyrsta sinni safnað úr svæðinu vestan Syðstu-Kollu þar sem gufuvirkni hófst 2008. Efnasamsetning sýnanna fjögurra sem hefur verið safnað úr G-109 er mjög áþekkt öðrum sýnum af hrygg Námafjalls; þ.e. úr gufuaugum G-101, G-108 og G-110. Heildargasstyrkur reiknast nú 236 mmól/kg. Athygli vekur að styrkur N₂ og Ar er nokkuð hár samanborið við önnur sýni ofan af Námafjalli en þó svipaður og í sýnum síðustu ára úr sama auga. Líkt og á við um hin gufuaugun á Námafjalli og austan þess er vetnisstyrkur talsvert hærri en sem nemur ætluðu jafnvægi við steindir. Sé honum sleppt reiknast efnahiti sýnisins 297°C. Samsætlutíðir í gufunni eru að mestu svipuð og í öðrum sýnum ofan af Námafjalli (myndir 19 og 20).

Tafla 9. Reiknaður efnahiti (°C) sýna úr gufuaugunum þremur og skyldum stöðum á Námafjalls-svæðinu. Notast er við kvarðanir Stefáns Arnórssonar o.fl. (1998). Tölum í sviga er sleppt við útreikninga á meðaltali (\bar{x}) og staðalfráviki (σ).

Sýni	Auga	T _{CO2}	T _{H2S}	T _{H2}	T _{CO2/N2}	T _{H2S/Ar}	T _{H2/Ar}	\bar{x}	σ
20210273	G-105	205	250	233	(181)	238	216	228	18
20190180	G-105	202	235	234	209	248	234	227	18
20180187	G-105	199	248	231	209	261	234	230	23
20170169	G-105	206	245	234	211	255	233	231	19
20160235	G-105	199	236	232	207	248	233	226	19
20150255	G-105	196	242	230	203	252	230	226	22
20140260	G-105	206	242	240	212	254	239	232	19
20130257	G-103	218	248	258	220	251	246	240	17
20120193	G-103	226	253	256	222	259	248	244	16
20210275	G-106	321	312	(402)	307	329	330	320	10
20190186	G-106	320	310	(406)	303	325	330	318	11
20180188	G-106	322	316	(411)	316	328	330	322	7
20170170	G-106	345	323	(439)	314	322	330	327	12
20160243	G-106	(374)	(341)	(479)	308	321	330	320	11
20150256	G-106	324	322	(439)	299	323	332	320	12
20140269	G-106	332	330	(422)	306	333	329	324	11
20130260	G-104	306	313	(352)	307	302	293	304	7
20210274	G-109	309	300	(388)	270	295	309	297	16
20180190	G-109	300	312	(398)	262	301	309	297	20
20170174	G-109	299	309	(399)	273	306	315	300	16
20160237	G-109	283	305	(396)	283	317	324	302	19



Mynd 19. Gasstyrkur í gufu og samsætuhlutföll í þéttvatni úr gufuaugum á Námafjallsvæðinu 2012–2021. Sumarið 2021 var sýnum safnað úr G-105 í Bjarnarflagi, G-106 á Hverum og G-109 suðvestarlega á Námafjalli.



Mynd 20. Samsætuvið sýna áráanna 2012–2021 úr gufuaugum á Námafjallssvæðinu ásamt úrkomulínu Craigs (1961). Einnig eru sýndir ferlar fyrir suðu grunnvatns við 100°C (blár) og gufu sem myndast við þrýstifallssuðu djúpvatns úr B-9 (bleikur) og B-11 (rauður).

2.3.3 Söguleg samantekt

Talsverður innbyrðis munur er milli þeirra þriggja undirsvæða í Námafjalli þar sem gufuvirkni á yfirborði er nægilega mikil til að ná megi sýnum af gufunni. Djúphiti er lægstur í Bjarnarflagi, nærri 230°C, en hækkar eftir því sem austar dregur, er um 300°C á Námafjalli sjálfu og um 320°C á Hverum og helst þar í hendur við heildargasmagn í gufunni. Þessi hitastigsdreifing er svo til óbreytt frá þeirri sem birt var hjá Halldóri Ármannssyni (1993). Hár vetnisstyrkur gefur til kynna að nokkur djúpgufa sé til staðar undir Námafjalli og Hverum en vetnisstyrkur í Bjarnarflagi er í samræmi við það sem vænta má miðað við að jarðhitavökvinn sé í jafnvægi við berg. Aftur á móti samræmist koldíoxíðstyrkur í Bjarnarflagi og á Hverum jafnvægi milli djúpvökva og bergs en koldíoxíðstyrkur á hrygg Námafjalls er lægri en hann ætti að vera, væri kerfið í slíku jafnvægi. Þetta kann að benda til þess að magn koldíoxíðs sem berst upp gegnum fjallið sé minna en sem nemur því sem þarf til að viðhalda þessu jafnvægi, eða að hluti koldíoxíðsins falli út á leiðinni upp gegnum fjallið, til dæmis sem kalsít. Þetta er í samræmi við lágt gasflæði um jarðveg á Námafjalli sem sást í mælingum árin 2010, 2013 og 2016 (Auður Agla Óladóttir, 2010; Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2013b; 2016).

Styrkur steinefna í þéttivatni er almennt mjög lágur; Cl og Na mælast alls staðar 0,1 mg/kg eða lægri og B er undir greiningarmörkum (<0,004 mg/kg) í öllum sýnum. Það gefur til kynna að hvorki sé um að ræða verulegan meðburð vatns né kvikugas í gufunni.

Afgerandi munur undirsvæðanna þriggja sést einnig í samsætugildunum (mynd 20). Gufan sem kemur upp í Hverum, austast í kerfinu, er mjög létt ($\delta D \approx -120\%$) og sýnir mikla súrefnis-hliðrun (8–9‰) sem bendir til umtalsverðra efnaskipta við berg. Þegar komið er upp á Námafjall sjálft mælist hærra hlutfall tvívetnis og gildi á bilinu -110 til -115‰ mega teljast

dæmigerð þótt reyndar spanni sýnin allt frá -118 til -102‰. Súrefnishliðrun á þessu svæði er 3–5‰ sem bendir til þess að efnaskipti milli bergs og vatns séu ekki gengin jafn langt og í Hverum. Tvívætnisgildi Bjarnarflagsgufunnar eru á bilinu -124 til -108‰ og hafa farið lækkandi síðan 2019, líkast til vegna þéttingar gufu undir yfirborðinu. Sýnin úr Bjarnarflagi sýna hins vegar svolitla neikvæða súrefnishliðrun (0,5–1,5‰) og liggja því vinstra megin við úrkomulínuna. Það bendir til þess að gufan þar sé mynduð við suðu á grunnvatni eða hugsanlega blöndu djúpvatns og grunnvatns.

Í reiknuðum djúpvökva háhitaholna í Bjarnarflagi er δD á bilinu -100 til -90‰ (Darling and Ármannsson, 1989; Finnbogi Óskarsson, 2012a) en í kalda grunnvatninu í Mývatnssveit eru dæmigerð samsætugildi $\delta D \approx -92$ ‰ og $\delta^{18}O \approx -12,7$ ‰ (meðaltal fyrir Vogaflóa; K-558; gögn úr efnagagnagrunni ÍSOR). Ferlar sem sýna samsætu hlutföll gufu sem myndast við suðu grunnvatns við 100°C (blár) og þrýstifallssuðu djúpvatns úr holum B-9 (bleikur) og B-11 (rauður) eru teiknaðir inn á mynd 20, reiknaðir út frá jöfnum Horita og Wesolowski (1994). Þeir renna stöðum undir þá tilgátu að gufan í Bjarnarflagi gæti hafa myndast við suðu á grunnvatni eða blöndu grunnvatns og djúpvatns, t.d. úr holu B-9, meðan sýnum af Námafjalli sjálfu svipar heldur til gufu sem myndast við suðu á djúpvökva B-11. Samsætu hlutföll gufunnar í Hverum eru hins vegar talsvert frábrugðin því sem vænta má fyrir gufu myndaða við suðu djúpvökva úr vinnsluholum í Bjarnarflagi. Það gæti bent til þess að annað vökvakerfi liggja undir austasta hluta yfirborðsvirkinnar á Námafjallssvæðinu, eða í öllu falli að blöndun innan jarðhitakerfisins í Námafjalli sé lítil þvert á sprungustefnuna.

3 Vöktun á efnasamsetningu grunnvatns

Í þessum kafla verður greint frá niðurstöðum efnagreininga sem gerðar voru á vatni í tengslum við vöktun grunnvatns í Mývatnssveit, á Þeistareykjum og í Kelduhverfi árið 2021. Starfsmenn ÍSOR söfnuðu sýnum samkvæmt verklagi ÍSOR (Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson, 2006b). Styrkur brennisteinsvetnis, rafleiðni og sýrustig var mælt við sýnatöku auk hitastigs. Sýrustig var einnig mælt samhliða mælingu á karbónati og leiðni á rannsóknarstofu ÍSOR innan tveggja til þriggja sólarhringa frá sýnatöku. Styrkur aðalefna var ákvarðaður á rannsóknarstofu ÍSOR en snefilefni voru greind hjá ALS Laboratories í Luleå í Svíþjóð. Samsætur síurefnis og vetnis voru mældar hjá Isotech Laboratories í Illinois í Bandaríkjunum. Sýna-meðhöndlun og efnagreiningaraðferðum er lýst í viðauka.

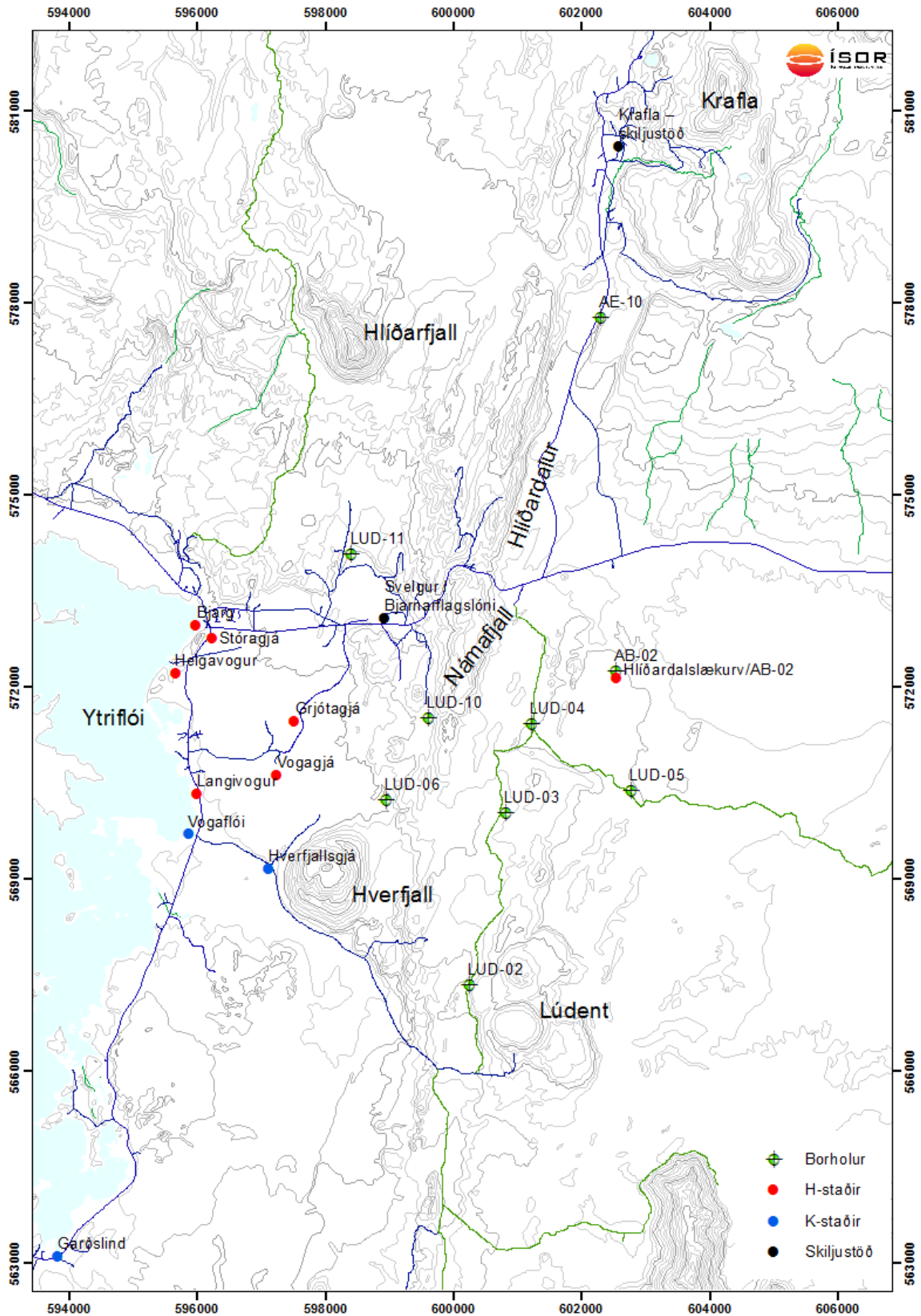
3.1 Mývatnssveit

Aðdraganda umhverfisvöktunar með affallsvatni frá Kröflu- og Bjarnarflagsvirkjunum er lýst í skýrslu Halldórs Ármannssonar og Magnúsar Ólafssonar (2004) en tillögur að eftirliti voru settar fram í skýrslum Halldórs Ármannssonar og Magnúsar Ólafssonar (2002) og Halldórs Ármannssonar (2003). Aðferðin byggist á því að fylgjast með „náttúrulegum ferilefnum“ á borð við arsen sem eru til staðar í margfalt hærri styrk í affallsvatni virkjananna en grunnvatni, í stað þess að nota til þess sérstök ferilefni (t.d. NDS, Na-Flu, Rhodamin, KI). Á grundvelli samkomulags við Umhverfisstofnun var grunnvatn í Mývatnssveit vaktað að jafnaði á tíu eftirlitsstöðum tvisvar á ári frá árinu 2004 og niðurstöður hafa verið birtar árlega í skýrslum sem ÍSOR hefur tekið saman fyrir Landsvirkjun (Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson, 2004, 2005, 2006a, 2007, 2012; Halldór Ármannsson o.fl., 2008, 2009, 2010, 2011; Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2013a, 2013b, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019; Finnbogi Óskarsson o.fl., 2019; Albert Þorbergsson o.fl., 2020). Á árinu 2013 varð sú breyting á vöktuninni að vöktunarstöðum var fjölgað úr 10 í 20 og sýnataka fer nú fram einu sinni á ári (Umhverfisstofnun, 2014). Starfsmenn ÍSOR annast sýnatöku, efnagreiningar og úrvinnslu gagna. Á hverjum sýnatökustað eru tekin sk. heilsýni af vatni til greininga á aðalefnum og völdum snefilefnum, auk samsætna vetnis og síurefnis.

Á árinu 2021 fór sýnataka að mestu leyti fram í byrjun september en þar sem þá var vinnslustopp í Kröflu var sýnum af affallsvatni virkjunarinnar og Hlíðardalslæk safnað í byrjun ágúst. Alls voru tekin sýni á 18 stöðum.

Yfirlit um sýnatökustaðina er sýnt í töflu 10 og á mynd 21. Að þessu sinni voru, að ósk Landsvirkjunar, ekki tekin sýni úr holum LUD-5 og LUD-10, né úr Hverfjallsgjá. Djúpdælur eru í öllum vöktunarholum á Mývatnssvæðinu og í töflu 10 er einnig sýnt hve miklu var dælt úr hverri holu við sýnatöku. Hóla AE-10 var í stöðugu rennsli gegnum sturtu á þeim tíma sem sýni var tekið. Dælan í holu LUD-11 hélt áfram að slá ítrekað út rafstöðinni líkt og undanfarin ár en engu að síður náðist sýni úr henni.

Ekki var unnt að mæla sýrustig á staðnum fyrstu dagana (9 sýni) vegna vandamála með rafskaut sýrustigsmælisins. Nýtt rafskaut var svo sent að sunnan og eftir það var sýrustig allra sýna mælt á staðnum. Sýrustig var í öllum tilfellum einnig mælt á rannsóknarstofu ÍSOR samhliða greiningu á styrk karbónats.



Mynd 21. Sýnatökustaðir í Mývatnssveit. Borholur eru sýndar grænar með krossi, volgar lindir eru rauðar, kaldar lindir bláar og manngerðir staðir eru svartir. Árið 2021 var sýnum safnað á 18 þessara staða.

Tafla 10. Vöktunarstaðir og yfirlit um dælt magn úr vöktunarholum í Mývatnssveit 2021.

Staður	Staðarnúmer	Sýnanúmer	Dagsetning	Hítastig (°C)	Magn (L)	Rennsli (L/s)
Krafla - skiljustöð	M-20008	20210272	8.10.2021	87,1		
Hlíðardalslækur v/AB-2	V-2356	20210271	8.10.2021	15,9		
AB-2	B-57842	20210374	6.9.2021	4,1	2904	0,40
AE-10	B-57890	20210400	8.9.2021	36,1		
LUD-2	B-58502	20210391	7.9.2021	6,2	2280	0,38
LUD-3	B-58503	20210375	6.9.2021	5,6	3444	0,35
LUD-4	B-58504	20210378	6.9.2021	5,3	1687	0,38
LUD-5 ^a	B-58505					
LUD-6	B-58506	20210398	8.9.2021	32,8	3264	0,80
LUD-10 ^a	B-58510					
LUD-11 ^b	B-58521	20210394	7.9.2021	6,6	900	0,75
Bjarnarflagslón	M-20004	20210396	7.9.2020	18,0		
Bjarg	H-10080	20210373	6.9.2020	19,2		
Helgavogur	H-10082	20210372	6.9.2021	23,0		
Stóragjá	H-10083	20210391	7.9.2021	27,1		
Grjótagjá	H-10085	20210399	8.9.2021	44,9		
Vogagjá	H-10087	20210395	7.9.2021	39,8		
Langivogur	H-10088	20210377	6.9.2020	21,0		
Vogafloí	K-558	20210393	7.9.2021	6,6		
Garðslind	K-556	20210376	6.9.2021	6,2		
Hverfjallsgjá ^a	K-559					

^a Sýni ekki tekið á þessu ári að ósk Landsvirkjunar.

^b Sýni safnað en dæling var minni en vant er þar sem dæla sló ítrekað út rafmagni.

Niðurstöður efnagreininga eru sýndar í töflu 11. Athugið að mælingar á litíum og titáni voru frá ÍSOR (þessi frumefni eru ekki með í mælingum frá ALS Laboratories).

Til að einfalda framsetningu efnagreininga á myndum hér aftan við hafa vöktunarstaðir verið flokkaðir í þrennt á myndunum:

- Sýni af affallsvatni frá skiljustöð í Kröflu og úr Bjarnarflagslóni, auk sýna úr Hlíðardalslæk við holu AB-2 og holu LUD-4, sem hafa hæstan styrk arsens og áls (myndir 22–24).
- Sýni úr öðrum borholum (myndir 26–28).
- Sýni úr heitum, volgum og köldum lindum og gjám (myndir 29 og 30).

Tafla 11. Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum haustið 2021. Styrkur efna í mg/L.

Staðarnafn	Skiljustöð	AE-10	Hlíðardalslækur	AB-2
Staður	M-20008	B-57890	V-2356	B-57842
Dagsetning	2021-08-10	2021-09-08	2021-08-10	2021-09-06
Sýnanúmer	20210272	20210400	20210271	20210374
Hitastig (°C)	87,1	36,1	15,9	4,1
Sýrustig (pH°C) - ÍSOR	9,94 / 20,9	8,11 / 21,4	7,99 / 16,7	7,88 / 21,0
Sýrustig (pH°C) - Felt	9,56 / 31,3	8,27 / 36,1	8,39 / 15,9	-
Leiðni við 25°C (µS/cm)	1287	342	483	147
Karbonsat (CO ₂)	46,0	77,2	68,0	46,0
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	25,4	<0,03	<0,03	<0,03
Bór (B)	1,25	0,00885	0,209	0,00418
Kísill (SiO ₂)	628	48,6	116	25,9
Natríum (Na)	273	42,2	59,3	9,40
Kalíum (K)	38,6	1,58	7,80	1,49
Magnesíum (Mg)	0,00349	1,16	7,86	5,64
Kalsíum (Ca)	3,15	31,8	24,6	11,1
Flúoríð (F)	1,65	0,172	0,372	0,264
Klóríð (Cl)	52,6	3,94	11,4	3,91
Brómíð (Br)	0,086	0,011	0,017	0,029
Súlfat (SO ₄)	297	72,3	130	11,6
Ál (Al)	1,76	0,00754	0,254	0,00406
Arsen (As)	0,0292	<0,00005	0,00919	0,000504
Baríum (Ba)	0,00344	0,00102	0,00126	0,000300
Kadmíum (Cd)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Kóbalt (Co)	<0,000005	<0,000005	0,0000486	0,00000521
Krómm (Cr)	<0,00001	<0,00001	0,00162	0,000474
Kopar (Cu)	0,000235	<0,0001	0,000759	0,000705
Járn (Fe)	0,00317	0,0435	0,0642	0,00141
Kvikasilfur (Hg)	0,000456	<0,000002	0,00000414	<0,000002
Lítíum (Li)	0,245	<0,02	0,0437	<0,02
Mangan (Mn)	0,00109	0,0104	0,00585	0,000186
Mólybden (Mo)	0,00143	0,000593	0,000915	0,000295
Nikkel (Ni)	<0,00005	0,0000698	0,000388	0,000167
Fosfór (P)	<0,001	0,00349	0,0130	0,0696
Blý (Pb)	<0,00001	0,000012	0,0000112	<0,00001
Strontíum (Sr)	<0,002	0,0602	0,0305	0,0128
Títan (Ti)	<0,12	<0,02	<0,02	<0,02
Vanadíum (V)	0,00191	0,0000263	0,0111	0,0220
Sink (Zn)	0,000398	0,000261	0,00199	0,00397
Uppleyst steinefni (UE)	1472	248	419	93
δD (‰ SMOW)	-80,8	-89,5	-70,9	-89,3
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-9,32	-12,43	-8,85	-12,34

Tafla 11. (Frh.). Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum haustið 2021. Styrkur efna er í mg/L.

Staðarnafn	LUD-2	LUD-3	LUD-4	LUD-6	LUD-11
Staður	B-58502	B-58503	B-58504	B-58506	B-58521
Dagsetning	2021-09-07	2021-09-06	2021-09-06	2021-09-08	2021-09-07
Sýnanúmer	20210391	20210375	20210378	20210398	20210394
Hitastig (°C)	6,2	5,6	5,3	32,8	32,1
Sýrustig (pH/°C) - ÍSOR	8,43 / 26,8	8,34 / 21,0	8,02 / 21,9	8,19 / 17,9	7,70 / 21,5
Sýrustig (pH/°C) - Felt	-	-	-	8,31 / 32,8	7,61 / 32,1
Leiðni við 25°C (µS/cm)	206	185,8	302	372	519
Karbonsát (CO ₂)	66,8	58,3	53,2	106	153
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Bór (B)	0,0409	0,0277	0,0838	0,0526	0,0407
Kísill (SiO ₂)	22,2	21,3	49,1	57,9	69,3
Natríum (Na)	19,1	16,5	36,2	49,5	60,8
Kalíum (K)	2,09	1,92	2,35	5,96	6,33
Magnesium (Mg)	7,40	7,09	7,99	7,68	9,70
Kalsíum (Ca)	12,2	11,3	12,6	18,9	38,4
Flúoríð (F)	0,243	0,257	0,270	0,324	0,233
Klóríð (Cl)	5,44	5,27	7,30	5,26	5,48
Brómíð (Br)	0,015	0,014	0,061	0,014	0,013
Súlfat (SO ₄)	16,1	13,8	69,2	58,3	95,1
Ál (Al)	0,0100	0,00687	0,137	0,00856	0,00258
Arsen (As)	0,000197	0,000177	0,00318	<0,00005	0,000120
Baríum (Ba)	0,000244	0,000278	0,000519	0,00338	0,00855
Kadmíum (Cd)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Kóbalt (Co)	<0,000005	<0,000005	0,00000775	<0,000005	0,0000119
Krómi (Cr)	0,00124	0,000807	0,000396	0,0000900	0,000369
Kopar (Cu)	0,00155	0,000488	0,000750	0,000161	0,000327
Járn (Fe)	0,00230	0,00504	0,0266	0,00996	0,0267
Kvikasilfur (Hg)	<0,000002	0,000003	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Lítíum (Li)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Mangan (Mn)	<0,00003	0,000346	0,00110	0,000842	0,00508
Mólybden (Mo)	0,000612	0,000603	0,000930	0,000789	0,000842
Nikkel (Ni)	0,0000552	0,0000903	0,000294	0,0000632	0,000464
Fosfór (P)	0,0546	0,0601	0,0407	0,0340	0,0186
Blý (Pb)	0,0000118	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001
Strontíum (Sr)	0,0150	0,0129	0,0168	0,0535	0,0684
Títan (Ti)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Vanadíum (V)	0,0292	0,0298	0,0138	0,00660	0,0238
Sink (Zn)	0,000877	0,000762	0,00185	0,000604	0,000458
Uppleyst steinefni (UE)	89	100	196	274	361
δD (‰ SMOW)	-91,4	-91,0	-80,2	-92,0	-86,7
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-12,61	-12,60	-10,71	-12,33	-12,24

Tafla 11. (Frh.). Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum haustið 2021. Styrkur efna er í mg/L.

Staðarnafn	Bjarnarflagslón	Bjarg	Helgavogur	Stóragjá	Grjótagjá
Staður	M-20004	H-10080	H-10082	H-10083	H-10085
Dagsetning	2021-09-07	2021-09-06	2021-09-06	2021-09-07	2021-09-08
Sýnanúmer	20210396	20210373	20210372	20210392	20210399
Hitastig (°C)	18,0	19,2	23,0	27,1	44,9
Sýrustig (pH/°C) - ÍSOR	9,75 / 21,7	8,14 / 19,5	8,29 / 19,7	8,25 / 17,7	8,26 / 21,1
Sýrustig (pH/°C) - Felt	9,57 / 18,0	7,90 / 19,2	8,13 / 23,0	-	8,41 / 44,9
Leiðni við 25°C (µS/cm)	752	317	388	435	453
Karbónat (CO ₂)	29,5	69,8	99,3	104	86,7
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	1,38	<0,03	<0,03	<0,03	0,03
Bór (B)	2,17	0,0686	0,0811	0,112	0,345
Kísill (SiO ₂)	529	56,5	67,8	80,2	139
Natríum (Na)	157	40,6	51,1	59,5	78,4
Kalíum (K)	24,4	3,46	4,48	5,25	7,76
Magnesíum (Mg)	0,871	3,57	5,32	5,22	2,48
Kalsíum (Ca)	3,24	14,3	23,6	24,2	13,3
Flúoríð (F)	0,713	0,260	0,255	0,327	0,409
Klóríð (Cl)	68,3	9,88	8,26	9,59	19,4
Brómíð (Br)	0,218	0,023	0,022	0,026	0,054
Súlfat (SO ₄)	94,6	45,0	65,0	79,4	86,7
Ál (Al)	1,38	0,00820	0,0134	0,0131	0,0534
Arsen (As)	0,131	0,000206	0,000302	0,000191	<0,00005
Baríum (Ba)	0,000921	0,000658	0,00154	0,00179	0,00210
Kadmíum (Cd)	<0,000002	0,00000465	0,00000338	<0,000002	<0,000002
Kóbalt (Co)	0,0000059	0,00000666	0,00000791	<0,000005	0,00000652
Króm (Cr)	0,0000398	0,000542	0,000647	0,00053	0,0000104
Kopar (Cu)	0,00109	0,00143	0,00146	0,000582	<0,006
Járn (Fe)	0,00844	0,00104	0,00109	0,000944	<0,002
Kvikasilfur (Hg)	0,00000398	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Lítíum (Li)	0,128	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Mangan (Mn)	0,00179	0,00124	0,000116	0,0000551	0,00385
Mólybden (Mo)	0,000476	0,00103	0,000864	0,000940	0,000200
Nikkel (Ni)	<0,00005	0,000124	0,000394	<0,00005	0,000120
Fosfór (P)	0,00349	0,109	0,0392	0,0315	0,0201
Blý (Pb)	0,0000344	<0,00001	0,0000211	0,0000106	<0,00001
Strontíum (Sr)	<0,002	0,0232	0,0347	0,0369	0,0198
Títan (Ti)	<0,12	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Vanadíum (V)	0,00192	0,0248	0,0266	0,0249	0,000351
Sink (Zn)	0,00238	0,00403	0,00500	0,00104	0,00105
Uppleyst steinefni (UE)	1049	201	290	292	329
δD (‰ SMOW)	-83,7	-90,6	-88,3	-86,6	-90,8
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-7,62	-12,46	-12,19	-11,99	-11,48

Tafla 11. (Frh.). Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum haustið 2021. Styrkur efna er í mg/L.

Staðarnafn	Vogagjá	Langivogur	Garðslind	Vogaflói
Staður	H-10087	H-10088	K-556	K-558
Dagsetning	2021-09-07	2021-09-06	2021-09-06	2021-09-07
Sýnanúmer	20210395	20210377	20210376	20210393
Hitastig (°C)	39,8	21,0	6,2	6,6
Sýrustig (pH/°C) - ÍSOR	8,44 / 21,7	8,50 / 21,6	8,65 / 21,0	8,41 / 21,2
Sýrustig (pH/°C) - Felt	-	-	-	-
Leiðni við 25°C (µS/cm)	480	460	149,6	200,2
Karborat (CO ₂)	71,9	73,2	49,6	56,8
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Bór (B)	0,294	0,204	0,00892	0,0333
Kísill (SiO ₂)	133	103	18,4	21,5
Natríum (Na)	81,7	65,7	18,4	22,1
Kalíum (K)	7,14	5,58	1,46	1,81
Magnesium (Mg)	2,31	3,86	4,66	6,10
Kalsíum (Ca)	14,5	13,7	7,01	10,8
Flúoríð (F)	0,424	0,375	0,203	0,216
Klóríð (Cl)	17,1	13,2	2,03	4,53
Brómíð (Br)	0,044	0,034	0,031	0,014
Súlfat (SO ₄)	112	83,8	7,87	22,7
Ál (Al)	0,0256	0,0145	0,0108	0,00505
Arsen (As)	<0,00005	0,0000878	0,000107	0,000170
Baríum (Ba)	0,00174	0,00150	0,000168	0,000326
Kadmíum (Cd)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Kóbalt (Co)	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005
Króm (Cr)	0,000124	0,000447	0,000942	0,00128
Kopar (Cu)	0,000396	0,000591	0,000203	0,000868
Járn (Fe)	0,000980	0,00213	0,0000717	<0,0004
Kvikasilfur (Hg)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Lítíum (Li)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Mangan (Mn)	0,0000977	0,0000335	<0,00003	<0,00003
Mólybden (Mo)	0,000218	0,000416	0,000705	0,000771
Nikkel (Ni)	0,000148	<0,00005	<0,00005	<0,00005
Fosfór (P)	0,0229	0,0341	0,0636	0,0576
Blý (Pb)	<0,00001	0,0000228	<0,00001	<0,00001
Strontíum (Sr)	0,0216	0,0199	0,00893	0,0139
Títan (Ti)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Vanadíum (V)	0,00579	0,0136	0,0358	0,0394
Sink (Zn)	0,00145	0,000618	0,000476	0,000755
Uppleyst steinefni (UE)	433	291	84	85
δD (‰ SMOW)	-90,9	-90,5	-92,5	-92,1
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-11,55	-11,80	-12,92	-12,60

Í reglugerð um varnir gegn mengun vatns nr. 796/1999 (tafla 12) eru tilgreind umhverfismörk fyrir málma: arsen, kopar, sink, kadmíum, blý, króm og nikkell. Engin viðmiðunarmörk eru til fyrir ál í íslenskum reglugerðum önnur en þau sem fram koma í íslenska staðlinum fyrir neysluvatn. Þar eru mörkin 0,2 mg/L og eru þau sýnd á þeim myndum sem það á við (reglugerð um neysluvatn nr. 536/2001). Leitað var álitis sérfræðings í fiskeldi varðandi eituráhrif áls í fiskeldi og er algengt viðmið að eitrarmörk áls sé um 0,3 mg/L gagnvart laxfiskum sem og öðrum fiskum (Branson, 1993).

Tafla 12. Umhverfismörk fyrir málma í yfirborðsvatni til verndar lífríki (styrkur efna í µg/L).

Umhverfismörk	I	II	III	IV	V
Kopar (Cu)	≤0,5	0-3	3,0-9,0	9-45	>45
Sínk (Zn)	≤5	5-20	20-60	60-300	>300
Kadmíum (Cd)	≤0,01	0,01-0,1	0,1-0,3	0,3-1,5	>1,5
Blý (Pb)	≤0,2	0,2-1	1-3	3-15	>15
Króm (Cr)	≤0,3	0,3-5	5-15	15-75	>75
Nikkell (Ni)	≤0,7	0,7-15	15-45	45-225	>225
Arsen (As)	≤0,4	0,4-5	5-15	15-75	>75

Skýringar við töflu 12:

Umhverfismörk I: Mjög lítil eða engin hættu á áhrifum.

Umhverfismörk II: Lítil hættu á áhrifum.

Umhverfismörk III: Áhrifa að vænta á viðkvæmt lífríki.

Umhverfismörk IV: Áhrifa að vænta.

Umhverfismörk V: Ávallt ófullnægjandi ástand vatns fyrir lífríki/þynningarsvæði.

Á myndum 22, 26 og 29A eru sýndar niðurstöður fyrir styrk arsens á vöktunarstöðum í Mývatnssveit og er stöðum skipt upp eins og áður hefur verið lýst. Líkt og oftast áður mælist styrkur arsens hæstur í affallsvatni í Bjarnarflagslóni eins og vel sést á mynd 22A. Þar og í affalli frá skiljustöð í Kröflu mælist styrkur arsens ofan við umhverfismörk III (15 µg/L) og í Hlíðardalslæk er styrkur arsens rétt ofan umhverfismarkna II eins og verið hefur undanfarin ár en innan við viðmiðunarmörk fyrir neysluvatn (10 µg/L) eins og nánar er sýnt á mynd 22B þar sem niðurstöðum fyrir Bjarnarflagslón hefur verið sleppt til að sýna betur styrk arsens í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk og LUD-4.

Vegna mikils styrks arsens í Bjarnarflagslóninu, sem sést á mynd 22A, er styrkur klóríðs, kísils, natríums, bórs, og brómíðs sem og arsens í vatni frá Bjarnarflagslóni teiknaður upp á mynd 25. Öll þessi efni og fleiri til hafa sýnt hækkandi efnastyrk 2018 þótt árið 2021 hafi þessi styrkur lækkað verulega miðað við árið 2020. Styrkur arsens í Bjarnarflagslóni er nú svipaður og mældur var á árunum 2014–2017. Líklega endurspeglar þetta breytingar eftir stækkun Jarðbaðanna og endurbætur á Bjarnarflagsvirkjun árin 2018 og 2019. Þessar breytingar hafa nú náð jafnvægi og vökvavinnslan er svipuð milli 2020 og 2021 (tafla 13).

Tafla 13. Vinnsla vökvu í Bjarnarflagi (í þúsundum tonna) frá 2016 til 2021.

Vökvavinnsla [Gg]	2016	2017	2018	2019	2020	2021
	1.530	1.573	933	2.347	1.896	1.947

Af vöktunarholum er styrkur arsens hæstur í vatni úr holu LUD-4 eins og verið hefur en arsenstyrkur hefur farið lækkandi undanfarin ár frá hámarki sem hann náði um 2010. Styrkur arsens í LUD-4 er nú vel innan við hámarksgildi fyrir neysluvatn (10 µg/L) og liggur einnig innan við umhverfismörk II eins og sést á mynd 26A. Til nánari greiningar á mæligildum fyrir arsen í eftirlitsholum eru niðurstöður sýndar á mynd 26B, án mælinga í LUD-4. Þar sést að styrkur arsens í AB-2 hefur verið lægri undanfarinn áratug en áratuginn þar á undan og má sjá sömu þróun í sýnum úr Hlíðardalslæk (mynd 22). Þetta má ugglaut rekja til minnkandi magns af affallsvatni sem fer frá skiljustöðinni í Kröflu til förgunar í Hlíðardalslæk vegna aukinnar niðurdælingar í borholur í Kröflu (tafla 14). Reyndar var vinnsla í Kröflu með minnsta móti árin 2020 og 2021 og niðurdæling að sama skapi lítil.

Tafla 14. Niðurdæling og vinnsla vökvva í Kröflu (í þúsundum tonna) frá 2015 til 2021.

Niðurdæling [Gg]	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
IDDP-1	270	-	-	-	-	-	-
KG-26	1.990	2.196	2.148	2.070	2.124	1.685	2.041
KJ-35	-	-	-	501	623	-	-
KJ-39	1.656	1.463	1.709	1.121	271	73	32
Heildarniðurdæling	3.916	3.659	3.857	3.692	3.018	1.758	2.073
Vökvavinnsla [Gg]	8.899	6.524	10.157	9.102	7.104	6.264	6.878

Styrkur arsens í sýnum úr heitum, volgum og köldum lindum er alls staðar innan við umhverfismörk I (0,4 µg/L) eins og sýnt er á mynd 29A, að frátöldum tveimur eldri mælingum úr Grjótagjá. Hæstur styrkur í lindunum er í Helgavogi, og hefur hækkað frá síðustu sýnatöku árið 2019. Í sýnum ársins 2021 mældist styrkur arsens innan greiningarmarka (0,05 µg/L) í Grjótagjá, Vogagjá og Langavogi. Athuganir á uppruna vatnsins til þessara sýnatökustaða (Finnbogi Óskarsson, 2018) og ferilprófun á affalli frá Jarðböðunum í Mývatnssveit (Magnús Ólafsson o.fl., 2020) sýna þó að skiljuvatn frá Bjarnarflagsvirkjun skilar sér á þessa þrjá staði. Líklegast er að arsen falli hratt út úr vatninu með myndlausum kísli (en skiljuvatnið er yfirmettað af kísli) og greinist því ekki.

Á myndum 23, 27 og 29B er sýndur styrkur áls á vöktunarstöðum og litlar markverðar breytingar koma þar fram. Haustið 2018 mældist ál í mjög lágum styrk í Bjarnarflagslóni, líkt og arsen, en síðan 2019 hefur styrkur áls og arsens mælst á svipuðum nótum og verið hefur lengst af frá því mælingar hófust þar. Styrkur áls í vatni frá Bjarnarflagslóni og skiljustöð í Kröflu mælist vel yfir hámarksgildi fyrir neysluvatn en á öðrum stöðum innan þess eins og sýnt er á mynd 23, þó er styrkur áls í LUD-4 rétt undir viðmiðunarmörkum (mynd 27). Niðurstöður sýna að styrkur áls í vatni úr vöktunarholunum, nema LUD-4, er alls staðar innan við hámarksgildi fyrir neysluvatn (200 µg/L). Mynd 27B sýnir niðurstöður greininga á styrk áls í sýnum úr vöktunarholum en þar hefur sýnum úr LUD-4 verið sleppt til betri aðgreiningar á niðurstöðum.

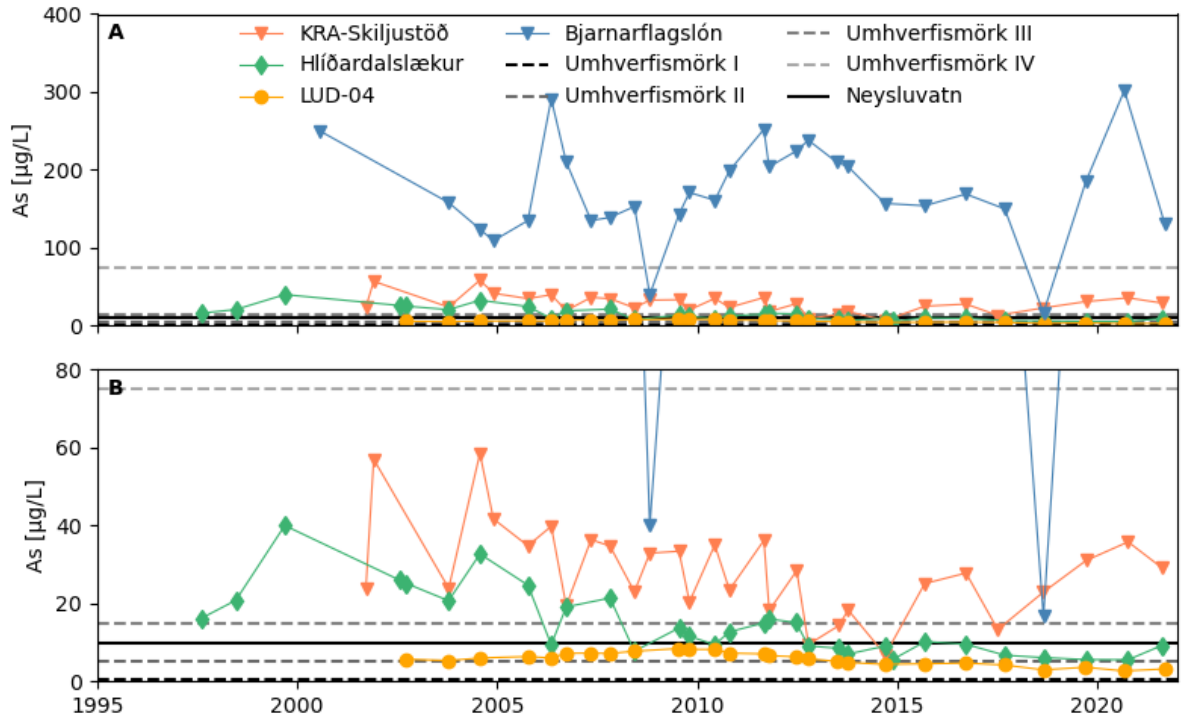
Niðurstöður mælinga á styrk áls í sýnum úr heitum, volgum og köldum lindum eru sýndar á mynd 29B. Þetta sýnir að breytingar eru vart marktækar milli árána 2019 og 2020, nema í Grjótagjá þar sem styrkur áls hefur verið að aukast frá 2018, og líka í Vogagjá og Langavogi síðan 2019. Mynd 31 sýnir mælingar á pH og nokkrum helstu frumefnum (kísill, natríum, bór og flúor) ásamt áli frá þessum þremur stöðum. Enga marktæka breytingu er að sjá þó að greina

megi lítills háttar hækkun á styrk flúoríðs og lítills háttar lækkun á kísilstyrk. Lauslegir jarðefnafræðilegir útreikningar benda ekki til þess að myndlaus kísill eða ál (álinnihaldandi steindir) hafi tilhneigingu til að falla út úr vatninu í Grjótagjá. Nefnt hefur verið að þessir sýnatökustaðir séu tengdir við Bjarnarflaglón (Finnbogi Óskarsson, 2018; Magnús Ólafsson o.fl., 2020). Styrkur áls sem hér mælist er hins vegar mjög frábrugðinn því sem mælist í lóninu (1,38 mg/L). Mælt er með því að halda áfram að fylgjast með þessum þremur sýnatökustöðum til að komast betur að því hvort breytingar á áli sem sjást séu náttúrulegar eða tengdar jarðhitastarfseminni í Bjarnarflagi.

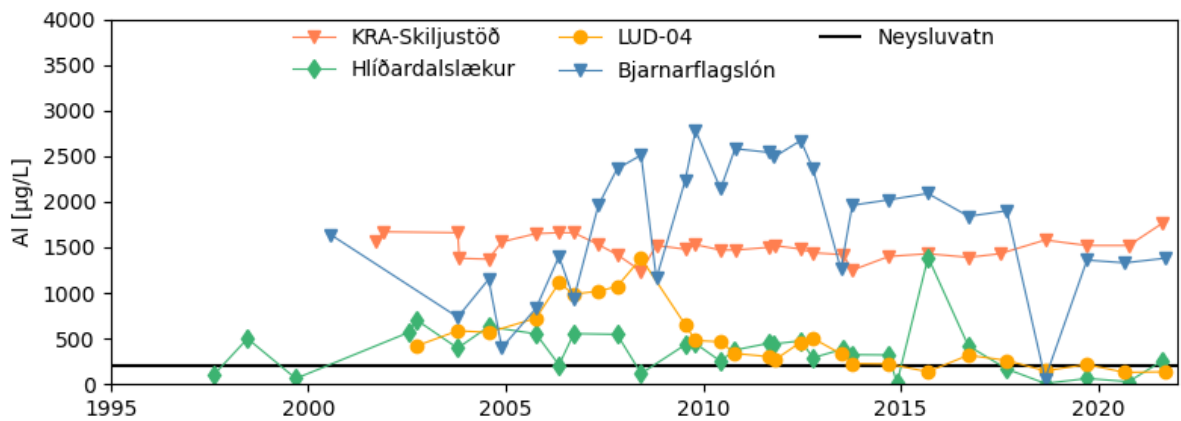
Mynd 24 sýnir styrk kopars, síns, kadmíums, blýs, króms og nikkels í affallsvatni frá skiljustöð í Kröflu, Bjarnarflaglóni, Hlíðardalslæk og holu LUD-4 ásamt viðeigandi umhverfismörkum úr reglugerð um varnir gegn mengun vatns nr. 796/1999. Nokkrir óreglulegir toppar sjást á myndunum, einkum í sýnum frá fyrri tíð, og þá verður að hafa í huga að hér er verið að mæla efni í mjög lágum styrk og óvissumörk eru því nokkuð við samanborið við mæligildið. Styrkur kopars (mynd 24A) er að jafnaði lægri en umhverfismörk II (3 µg/L), oft nærri umhverfismörkum I (0,5 µg/L). Styrkur síns (mynd 24B) er vel innan við umhverfismörk I (5 µg/L). Á síðastliðnum árum hefur styrkur kadmíums (mynd 24C) mælist um eða nærri umhverfismörkum I (0,01 µg/L) en á árum áður mátti sjá hærri gildi þar sem styrkur þess greindist jafnvel hærri en umhverfismörk III (0,3 µg/L) í einstökum sýnum. Ekki er ólíklegt að það stafi af minni næmni við greiningar á árum áður. Mynd 24D sýnir styrk blýs og kemur þar fram að styrkur þess er innan við umhverfismörk I (0,0002 mg/L), fyrir utan allnokkur sýni úr Bjarnarflaglóni frá því fyrir 2011 þar sem styrkur þess hefur mælist umtalsvert hærri, stundum við umhverfismörk II (1 µg/L) og í tveimur tilvikum yfir umhverfismörkum III (3 µg/L). Styrkur króms (mynd 24E) hefur verið allbreytilegur, sérstaklega í Bjarnarflaglóni og Hlíðardalslæk, en mældist nærri umhverfismörkum I (0,3 µg/L) á þessum stöðum í ár. Styrkur nikkels (mynd 24F) mælist að jafnaði hæstur í Hlíðardalslæk, rétt yfir umhverfismörkum I (0,7 µg/L), og hefur styrkur þess lækkað síðan 2019.

Mynd 28 sýnir styrk sömu málma og sýndir eru á mynd 24 en í sýnum úr vöktunarholum í Mývatnssveit. Mynd 28A sýnir að styrkur kopars hefur á undanförunum árum verið undir umhverfismörkum II (3 µg/L) og í flestum holum nærri umhverfismörkum I (0,5 µg/L) fyrir utan tvö hærri gildi fyrir 2010 úr holum LUD-2 annars vegar og LUD-4 hins vegar. Styrkur síns (mynd 28B) hefur verið vel innan við umhverfismörk I (5 µg/L) á undanförunum árum, nema í LUD-11 árið 2019. Styrkur kadmíums (mynd 28C) hefur á undanförunum árum mælist lágur, undir eða við greiningarmörk, og falla mæligildin nærri umhverfismörkum I (0,01 µg/L). Styrkur blýs (mynd 28D) mælist innan við umhverfismörk I (0,2 µg/L) á öllum stöðum. Á mynd 28E er sýndur styrkur króms í vöktunarholunum og mælist hann ýmist nærri umhverfismörkum I eða lítið eitt hærri og alls staðar vel innan umhverfismarkka II. Mynd 28F sýnir styrk nikkels í vöktunarholunum og mældist hann innan við umhverfismörk I (0,7 µg/L) á öllum stöðum árið 2021.

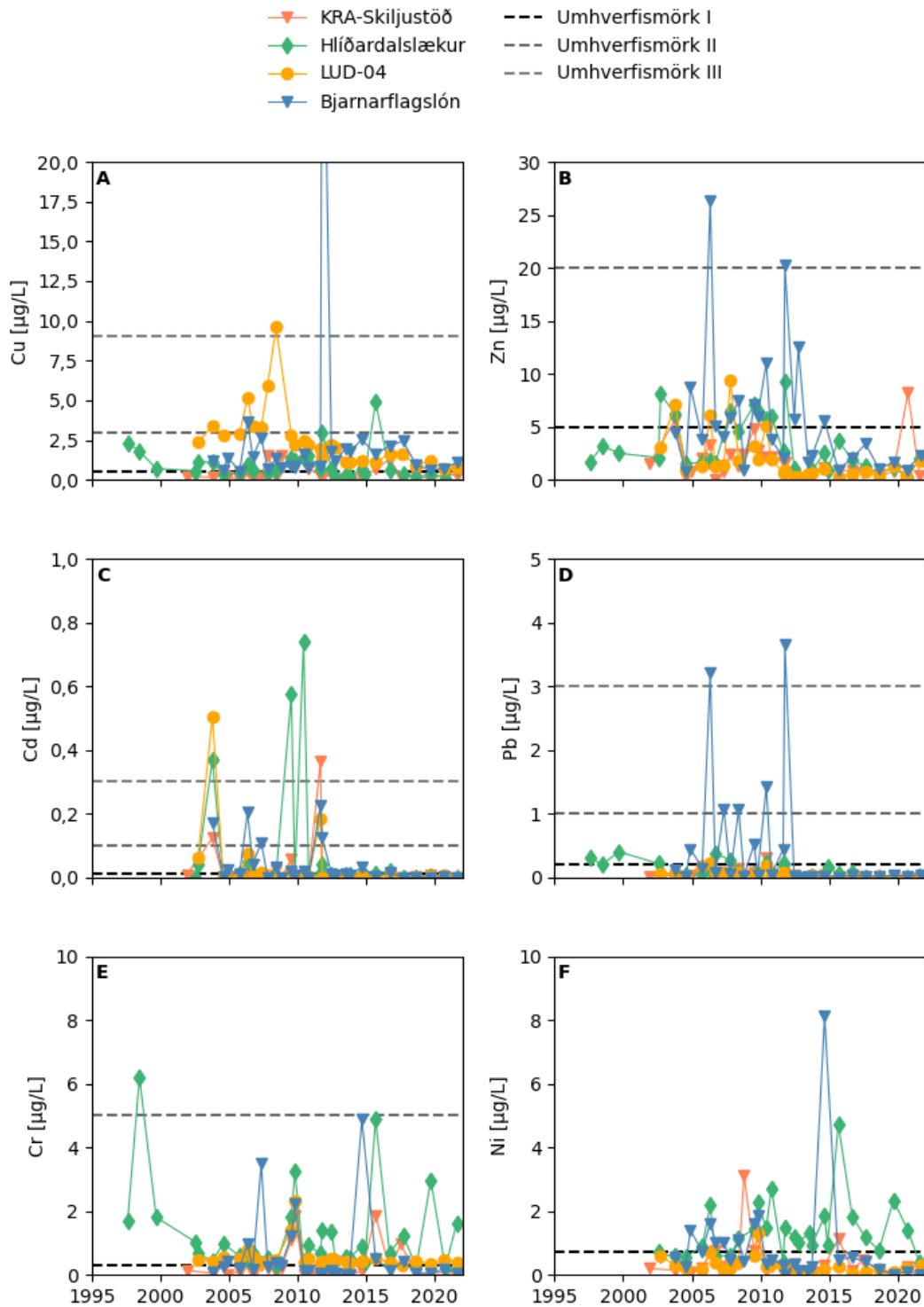
Mynd 30 sýnir styrk kopars, síns, kadmíums, blýs, króms og nikkels í sýnum úr heitum, volgum og köldum lindum í Mývatnssveit. Í heild sýna þær að styrkur þessara efna er lágur, nærri greiningarmörkum þessara málma og um eða innan við umhverfismörk I. Engar markverðar breytingar koma fram milli árana 2020 og 2021, nema vegna hækkunar á styrk síns í Helgavogi og Bjargi. Styrkur kopars, síns og nikkels í Helgavogi hefur lækkað frá sýni ársins 2019 og er styrkur síns nú við umhverfismörk I (5,0 µg/L).



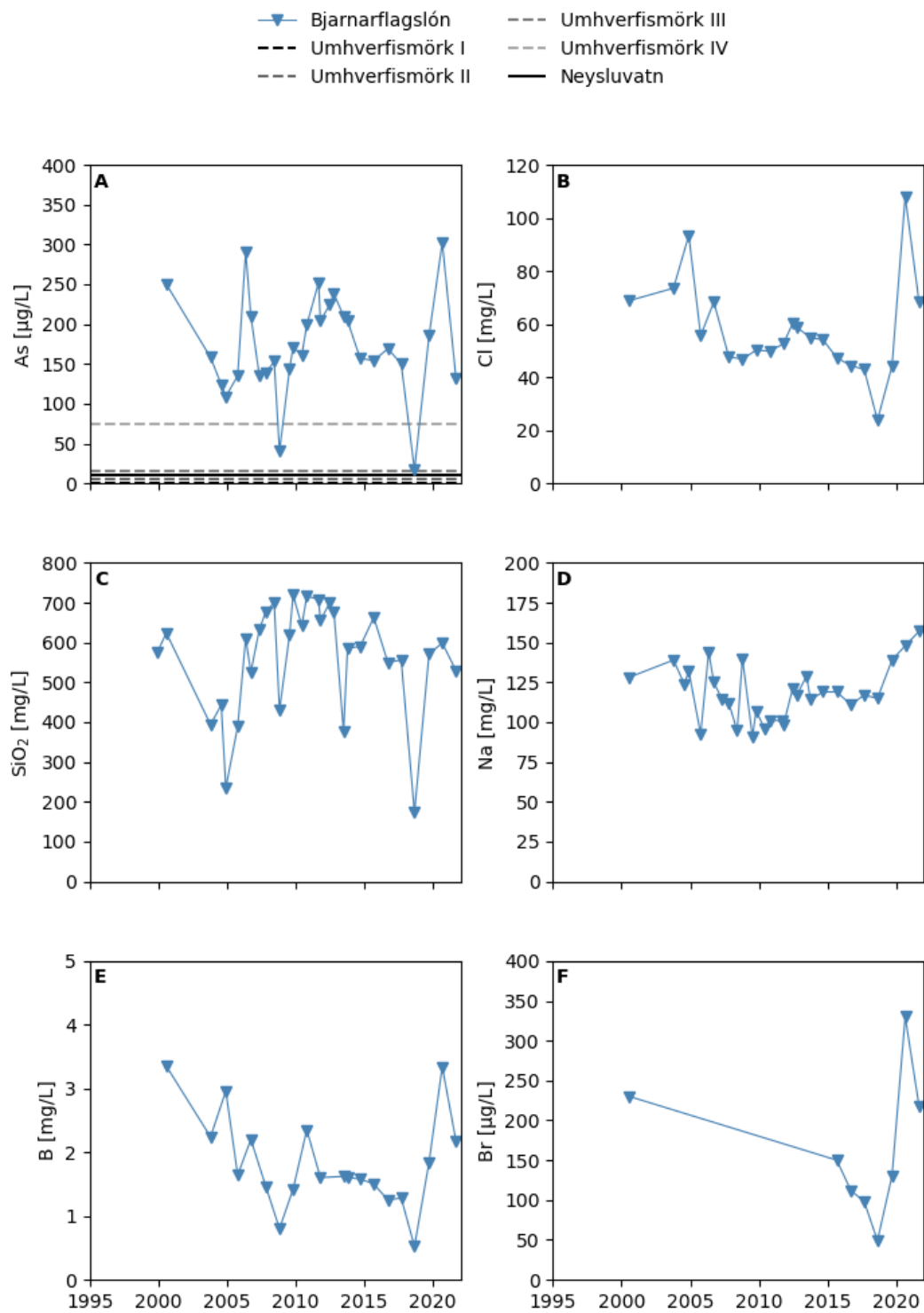
Mynd 22. (A) Styrkur arsens í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt umhverfismörkum I, II, III og IV og mörkum fyrir neysluvatn (10 µg/L). (B) Sama mynd með smærri kvarða til betri aðgreiningar á niðurstöðum.



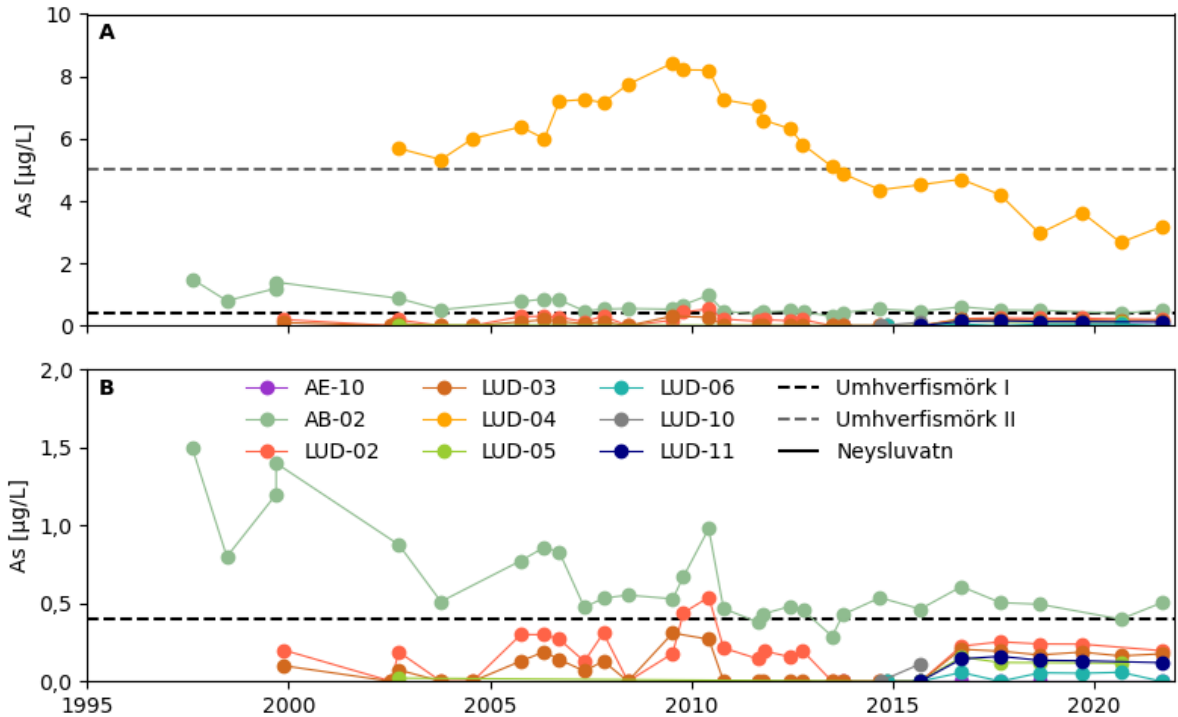
Mynd 23. Styrkur áls í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt viðmiðunarmörkum fyrir neysluvatn (200 µg/L).



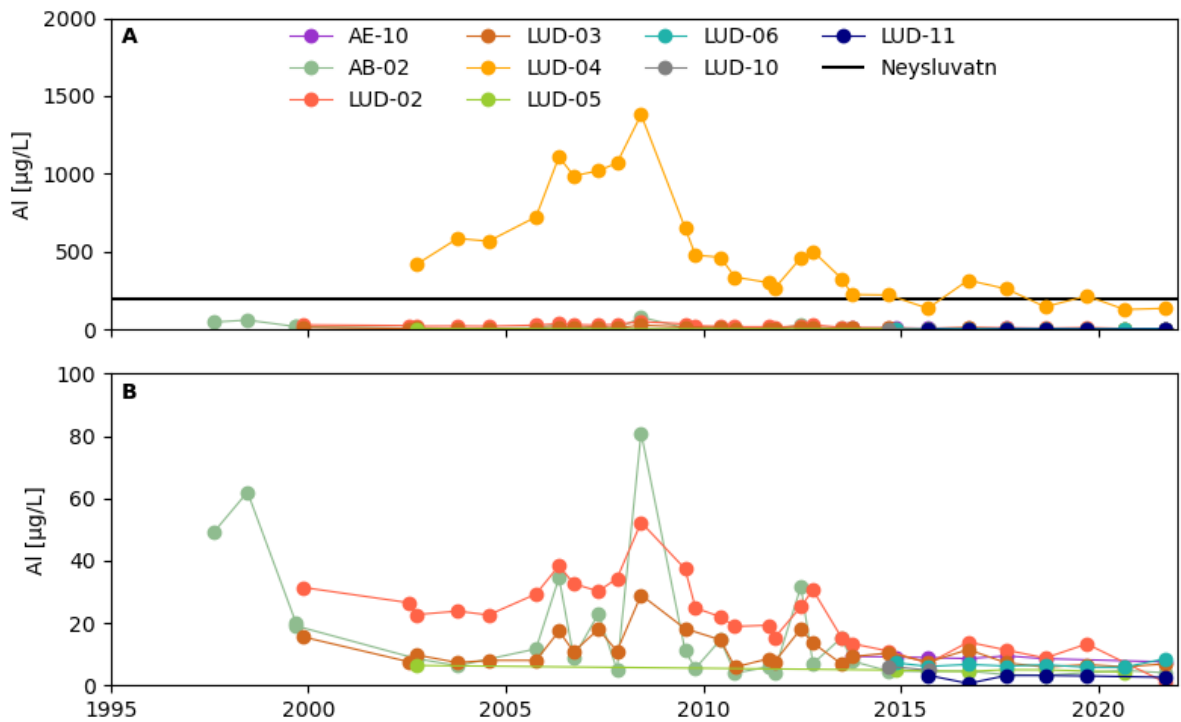
Mynd 24. Styrkur kopars (A), síns (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt umhverfismörkum I, II og III.



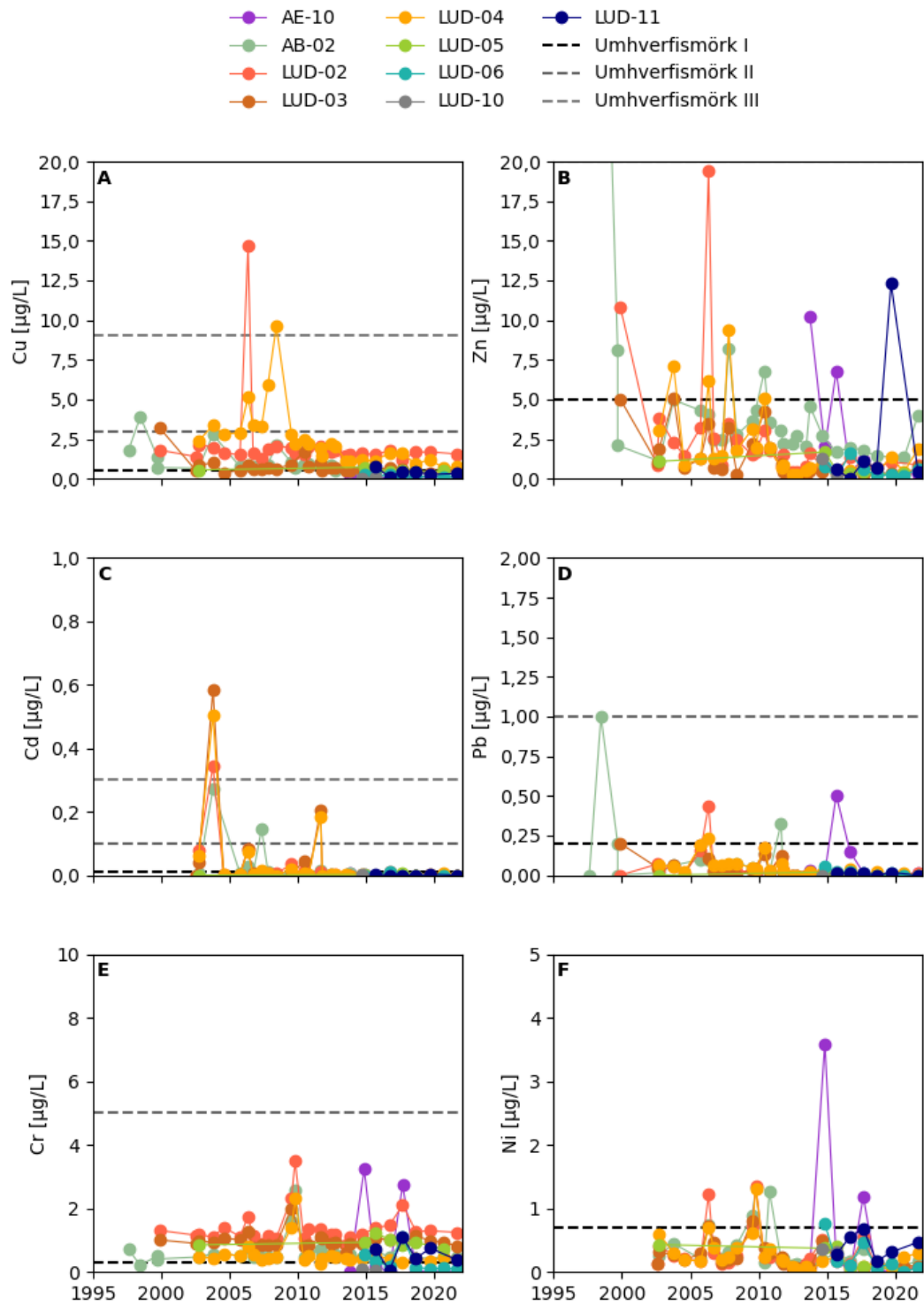
Mynd 25. Styrkur arsens (A), klóríðs (B), kísils (C), natríums (D), bórs (E) og brómíðs (F) í vatni frá Bjarnarflagslóni. Aðeins As hefur umhverfismörk.



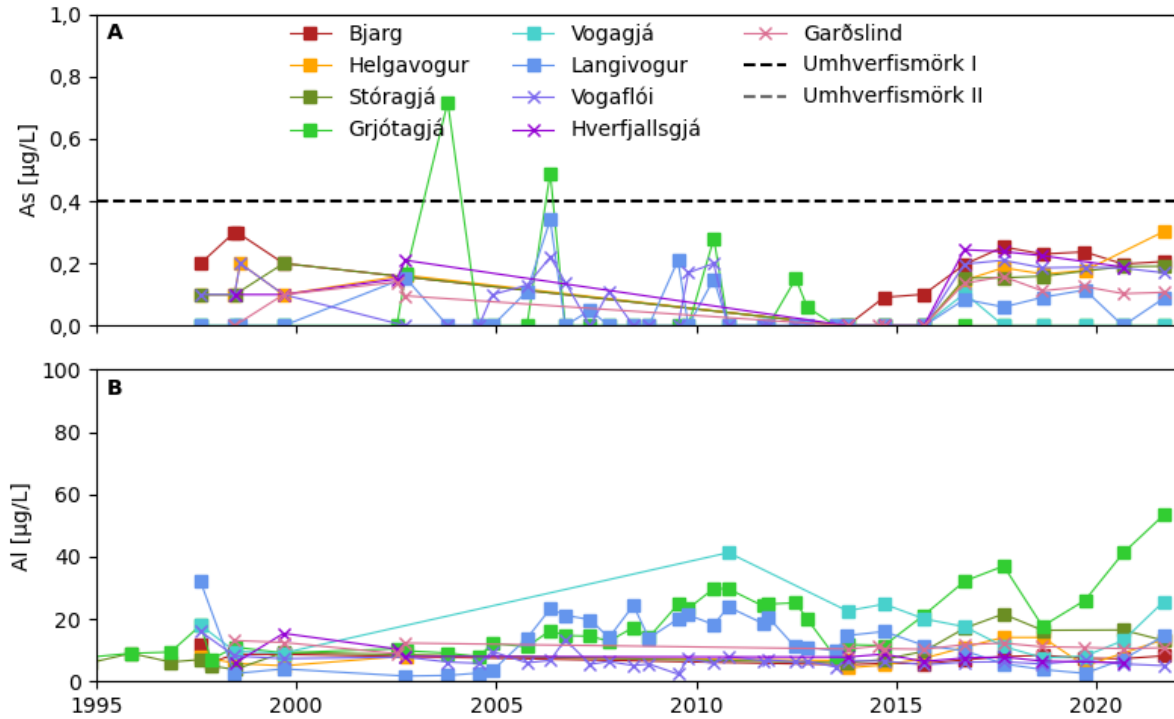
Mynd 26. (A) Styrkur arsens í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I og II. Viðmiðunarmörk fyrir styrk arsens í neysluvatni (10 µg/L) eru efst á myndinni. (B) Niðurstöðum fyrir LUD-4 hefur verið sleppt til betri aðgreiningar á niðurstöðum.



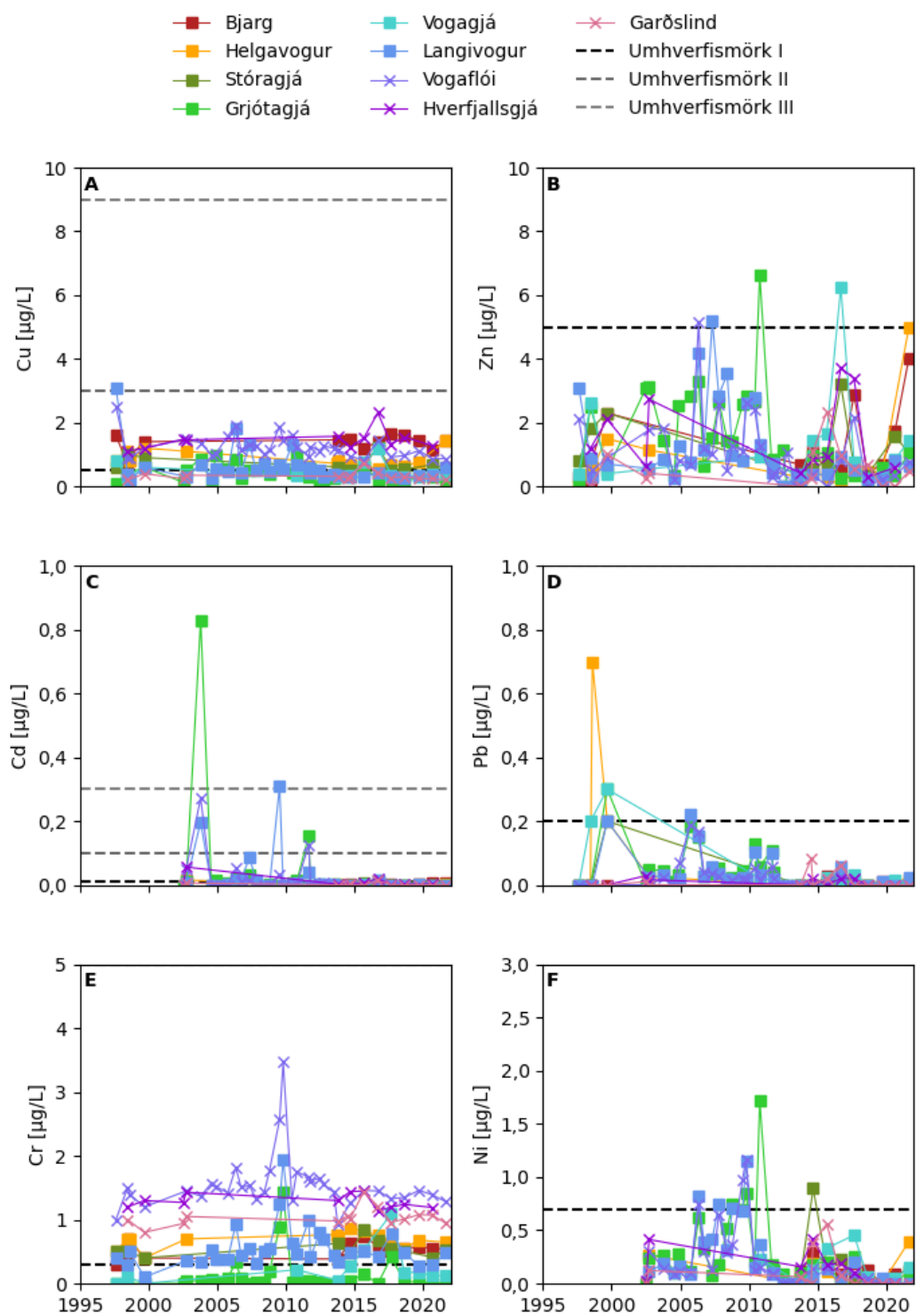
Mynd 27. (A) Styrkur áls í vatni úr borholum ásamt viðmiðunarmörkum fyrir neysluvatn (200 µg/L). (B) Niðurstöðum fyrir LUD-4 hefur verið sleppt til betri aðgreiningar á niðurstöðum.



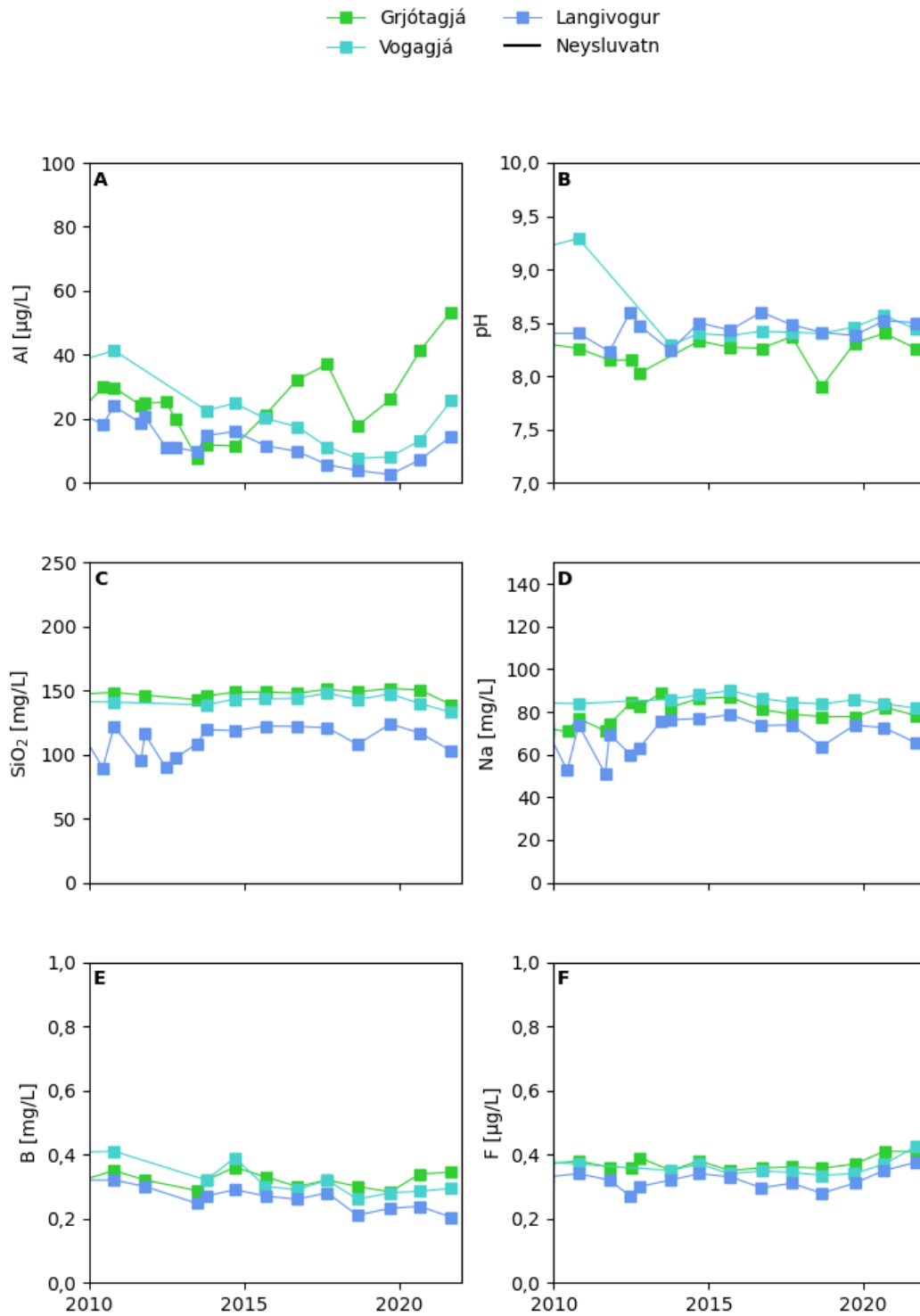
Mynd 28. Styrkur kopars (A), sínks (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I, II, og III.



Mynd 29. Styrkur arsens (A) og áls (B) í lindum við Mývatn ásamt umhverfismörkum I ($0,4 \mu\text{g/L}$) fyrir arsen. Viðmiðunarmörk fyrir neysluvatn ($200 \mu\text{g/L}$) falla utan kvarða myndar (B).



Mynd 30. Styrkur kopars (A), síns (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum I, II og III.



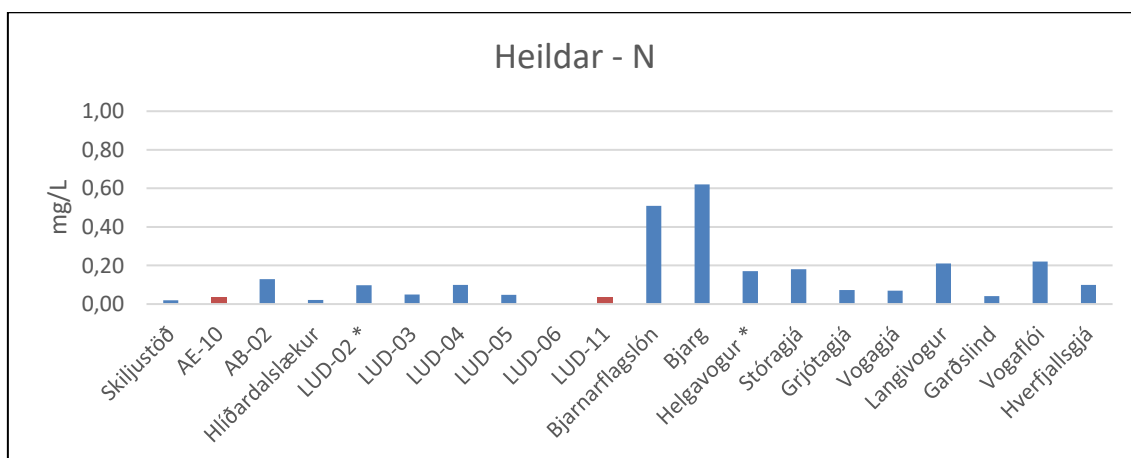
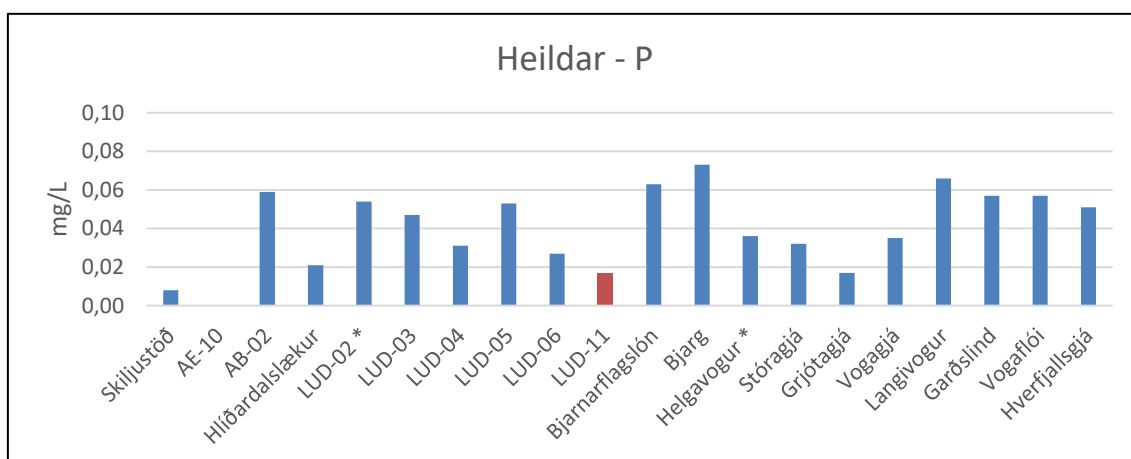
Mynd 31. Styrkur áls (A), pH (B), kísils (C), natríums (D), bórs (E) og flúors (F) í vatni frá Grjótagjá, Vogagjá og Langavogi. Neysluvatnsmörk fyrir ál (200 µg / L) eru skilgreind. (Neysluvatnsmörk fyrir bór eru 1,0 mg/L og flúór 1500 µg/L.)

3.1.1 Næringarefni í sýnum úr Mývatnssveit

Að beiðni Landsvirkjunar var sérstökum sýnum safnað samhliða sýnatöku haustið 2021 á LUD-11 og AE-10 í Mývatnssveit til greininga á næringarefnum (köfnunarefni (N) og fosfór (P)). Niðurstöður eru sýndar í töflu 15. Niðurstöður sams konar sýnatöku og efnagreininga á næringarefnum haustin 2017, 2019 og 2020 sýndu að styrkur þeirra mældist hæstur í lind neðan við Bjarg (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2017; Finnbogi Óskarsson o.fl., 2019; Albert Þorbergsson o.fl., 2020). Núverandi niðurstöður eru bornar saman við niðurstöður frá öðrum stöðum frá árunum 2017 og 2020 á mynd 32. Bæði LUD-11 og AE-10 hafa lágt heildar-N og heildar-P miðað við aðra sýnatökustaði. Hvorki greindist nítrít né nítrat í þessum borholum og ekkert ammóníak í LUD-11. AE-10 hefur hæstan styrk ammóníaks (0,033 mg/L) af öllum sýnatökustöðum (Bjarg og Grjótagjá eru næsthæst við ~0,025 mg/L). Magn fosfats í borholunum tveimur er svipað og í nálægum sýnatökustöðum. Styrkur er svipaður og mælist dæmigert í ám og grunnvatni á Íslandi (Eydís S. Eiríksdóttir og Svava B. Þorláksdóttir, 2021).

Tafla 15. Niðurstöður efnagreininga á næringarefnum í sýnum úr Mývatnssveit (mg/L).

Staður	Sýni	Nítrat-N (NO ₃ -N)	Nítrít-N (NO ₂ -N)	Ammóníak-N (NH ₃ -N)	Heildar -N	Fosfat-P (PO ₄ -P)	Heildar-P
LUD-11	20210394	<0,03	<0,0003	<0,003	0,032	0,019	0,017
AE-10	20210400	<0,03	<0,0003	0,027	0,033	0,0051	<0,003



*Sýni tekin árið 2017

Mynd 32. Styrkur köfnunarefnis og fosfórs í sýnum úr Mývatnssveit.

3.1.2 Ferilefni í sýnum úr Mývatnssveit

Að beiðni Landsvirkjunar var sýnum safnað á völdum stöðum til greininga á naftalensúlfónat-efnum sem notuð hafa verið sem ferilefni í ferilprófunum bæði í Kröflu (holur K-26, K-39 og IDDP-1; sjá Gadalia o.fl., 2016) og við Jarðböðin (hola LUD-12; sjá Magnús Ólafsson o.fl., 2020). Umbeðnar greiningar tengjast annars vegar áður nefndu ferilprófi við Jarðböðin (sýni úr Bjarnarflagslóni og lindum við Mývatn) og hins vegar áætlunum um ferilprófun á Kröflu-svæðinu (sýni úr skiljustöð í Kröflu og völdum borholum).

Sýnin voru greind á vökvaskilju á rannsóknarstofu ÍSOR og niðurstöður eru skráðar í töflu 16.

Leifar ferilefnanna þriggja (2,6-NDS, 2,7-NDS, 2-NS) sem notuð voru í Kröflu árin 2013 og 2016 sjást í vatni úr skiljustöðinni í Kröflu og telja má líklegt að þau megi einnig finna í skiljuvatni úr sumum vinnsluholnanna. Hins vegar mælist ekkert ferilefni í neinni grunnvatnsholnanna.

Leifar ferilefnisins (2,7-NDS) sem sett var niður í holu LUD-12 við Jarðböðin árið 2017 finnast enn í Grjótagjá en ekkert mælist lengur í vatni úr Vogagjá og Langavogi. Engin ferilefni mælast í öðrum lindum og gjám við Mývatn né í Bjarnarflagslóni.

Tafla 16. Niðurstöður greininga á ferilefnum í sýnum úr Mývatnssveit ($\mu\text{g/L}$).

Staður	Sýni	1,5-NDS	1,6-NDS	2,6-NDS	2,7-NDS	1-NS	2-NS
Skiljustöð	20210272	<0,1	<0,1	1,2	0,8	<0,1	0,4
AB-2	20210374	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
AE-10	20210400	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
LUD-4	20210378	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
LUD-11	20210394	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Bjarnarflagslón	20210396	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
Bjarg	20210373	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Garðslind	20210376	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Grjótagjá	20210399	<0,05	<0,05	<0,05	0,09	<0,05	<0,05
Helgavogur	20210372	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Langivogur	20210377	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Stóragjá	20210392	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Vogaflói	20210393	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Vogagjá	20210395	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05

3.2 Þeistareykir og Kelduhverfi

Í starfsleyfi Þeistareykjavirkjunar eru gerðar kröfur um eftirlit og vöktun með jarðhitakerfinu og grunnvatni á svæðinu. Einn liður í vöktuninni er að fylgjast með efnasamsetningu grunnvatns á Þeistareykjum og í grunnvatnsstraumnum sem þaðan rennur til sjávar í Öxarfirði, gegnum Kelduhverfi. Forsendur vöktunar grunnvatnsins voru raktar í vöktunarskýrslu fyrir árið 2012 (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2013b) og er hér vísað til rökstuðnings þar, t.d. um val á vöktunarstöðum.

Haustið 2021 fór sýnataka á Þeistareykjum og Kelduhverfi fram í byrjun september. Fjórum sýnum var safnað á Þeistareykjum og fjórum í Kelduhverfi.

Í Kelduhverfi er sýnum safnað úr köldum og volgum lindum og á Þeistareykjum hafa sérstakar holur verið boraðar fyrir grunnvatnseftirlit. Einnig er sýnum safnað úr vatnsbólum Þeistareykja vestan undir Ketilfjalli en sýnataka úr uppsprettu við sæluhús hefur verið aflögð. Yfirlit um sýnatökustaðina er gefið í töflu 17 og þeir eru einnig sýndir á mynd 33. Að þessu sinni voru að ósk Landsvirkjunar ekki tekin sýni úr lind við Fjöll í Kelduhverfi.

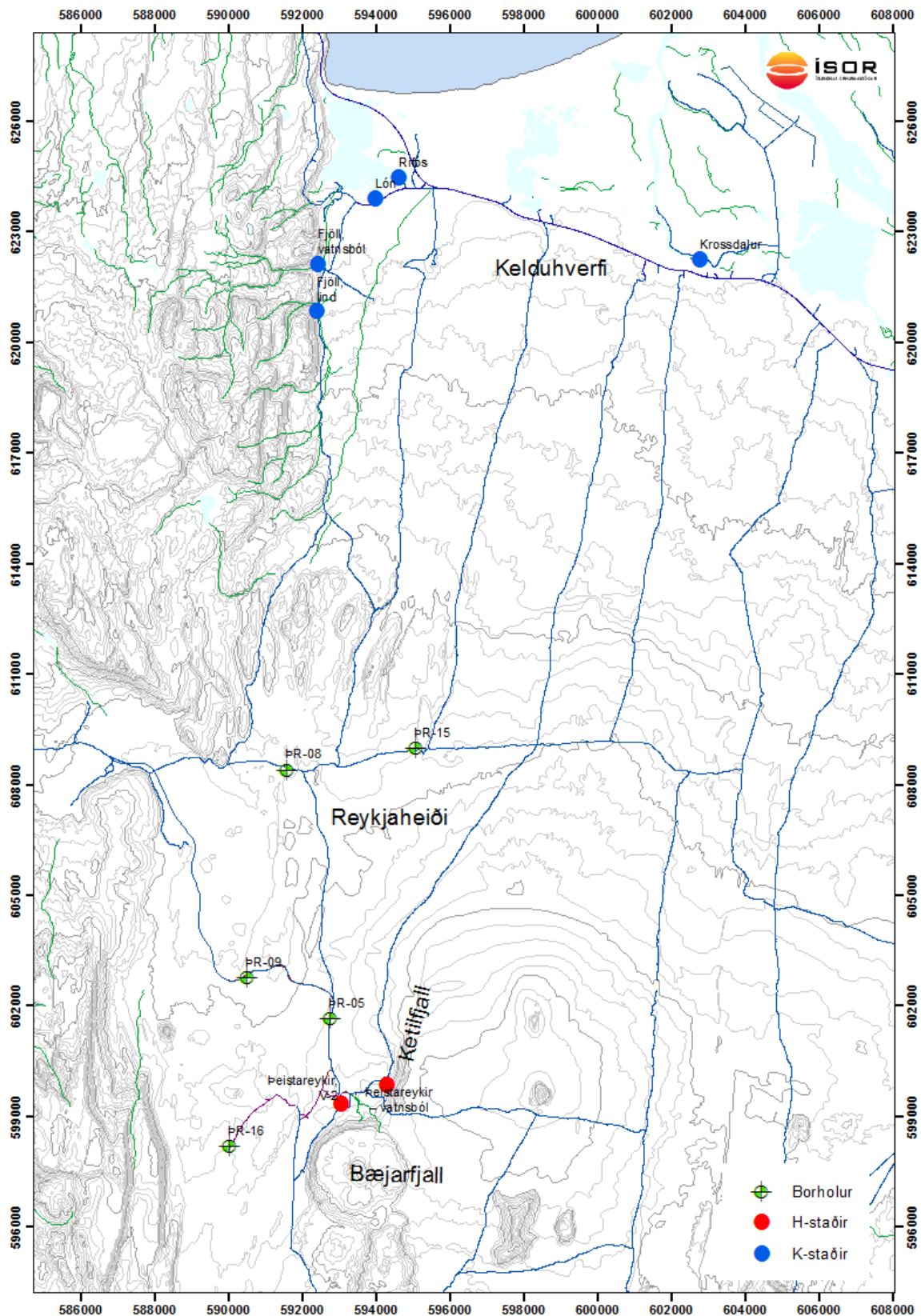
Djúpdælur eru í vöktunarholum á Þeistareykjum og í töflu 17 er einnig yfirlit um þær og hve miklu var dælt úr hverri holu við sýnatöku haustið 2021. Stærri rafstöð frá Þeistareykjum var notuð til að dæla úr grunnvatnsholunum. Vegna stærðar og þyngdar þessarar rafstöðvar var ekki hægt að aka henni nógu nálægt holu ÞR-8 til að taka sýni. Hóla ÞR-9 er vatnstökuhóla fyrir Þeistareykjavirkjun og var í stöðugri dælingu á þeim tíma sem sýni var tekið, líkt og verið hefur undanfarin ár.

Tafla 17. Vöktunarstaðir og yfirlit um dælt magn úr vöktunarholum á Þeistareykjum og í Kelduhverfi 2021.

<i>Staður</i>	<i>Staðarnr.</i>	<i>Sýni nr.</i>	<i>Dagsetning</i>	<i>Hitastig</i> (°C)	<i>Magn</i> (L)	<i>Rennsli</i> (L/s)
ÞR – vatnsból	M-20409	20210408	9.9.2021	18,7		
ÞR-8 ^b	B-60368					
ÞR-9	B-60369	20210406	9.9.2021	8,0		
ÞR-15	B-60376	20210405	9.9.2021	16,0	1968	0,4
ÞR-16	B-60377	20210407	9.9.2021	5,6	1476	0,3
Fjöll – vatnsból	K-568	20210404	8.9.2021	3,6		
Fjöll – lind ^a	K-2742					
Rifós	K-2743	20210402	8.9.2021	11,0		
Lón	K-2744	20210403	8.9.2021	5,0		
Krossdalur	K-2745	20210401	8.9.2021	4,4		

^a Sýni ekki tekið á þessu ári að ósk Landsvirkjunar.

^b Vegna vandræða við að flytja rafstöð var ekki hægt að taka sýni.



Mynd 33. Sýnatökustaðir í Kelduhverfi og á Peistareykjum. Borholur eru sýndar grænar með krossi. Volgar lindir eru rauðar og kaldar lindir bláar. Haustið 2021 var sýnum safnað á fjórum stöðum á Peistareykjum og fjórum í Kelduhverfi.

Niðurstöður efnagreininga úr Kelduhverfi og Þeistareykjum eru sýndar í töflum 18 og 19. Á mynd 34 eru sýndar niðurstöður fyrir styrk arsens og áls fyrir vöktunarstaði í Kelduhverfi og á mynd 36 eru sýndar niðurstöður fyrir mælingar á styrk kopars, sínks, kadmíums, blýs, króms og nikkels fyrir þessa sömu vöktunarstaði. Niðurstöður flestra mælinga á vöktunarstöðum í Kelduhverfi fyrir 2010 eru fengnar frá Háskólanum á Akureyri (Hrefna Kristmannsdóttir, 2010). Uppgefin umhverfismörk í reglugerðum eru skráð í töflu 12 og sýnd á myndunum.

Jarðhitaáhrifa gætir á sumum sýnatökustöðum á Þeistareykjum. Sést það t.d. vel í hækkuðum styrk kísils í vatni úr vatnsbóli vestan undir Ketilfjalli, vatnsbóli skálans og holu ÞR-15. Á öllum þessum stöðum er hitastig vatns einnig vel yfir grunnvatnshita á svæðinu. Sama á við um Rifós í Kelduhverfi.

Niðurstöður mælinga á arseni og áli í Kelduhverfi (mynd 34) sýna engar marktækar breytingar milli ára 2020 og 2021. Þrátt fyrir svolitla hækkun arsenstyrks við Rifós eru allar niðurstöður vel innan umhverfismarka I (0,4 µg/L) og fyrir ál eru allar niðurstöður langt undir hámarksgildi fyrir neysluvatn (200 µg/L).

Niðurstöður greininga á styrk kopars, sínks, kadmíums, blýs, króms og nikkels eru sýndar á mynd 36. Fyrir alla þessa málma (mynd 36) falla niðurstöður efnagreininga undanfarin ár innan við umhverfismörk I. Styrkur kopar og sínks lækkaði lítillega við Rifós árið 2020. Haustið 2019 mældist styrkur króms og nikkels óvenjulega hár í sýninu frá Lóni en svo er ekki í ár og 2020.

Mynd 35 sýna styrk arsens og áls í sýnum frá Þeistareykjum. Styrkur arsens mælist langt innan umhverfismarka I (0,4 µg/L) og breytist ekkert milli ára. Sama má í raun segja um styrk áls, hann mælist langt innan viðmiðunarmarka fyrir neysluvatn (200 µg/L) og breytist ekki mikið milli ára.

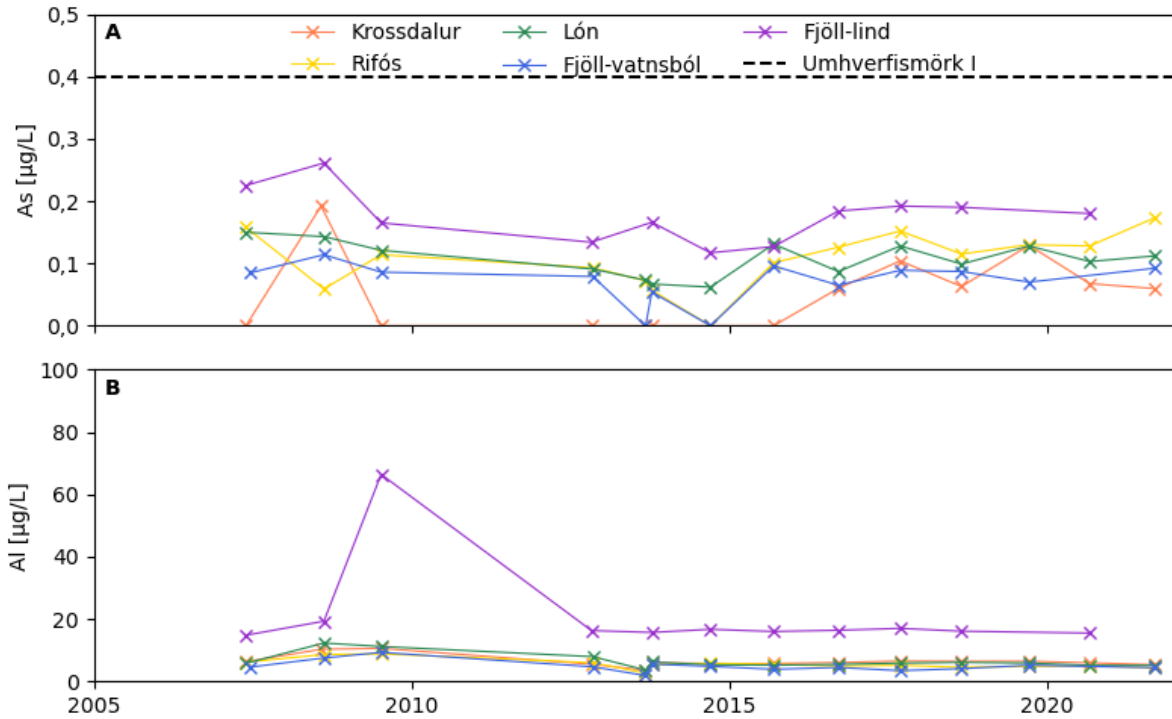
Styrkur kopars (mynd 37A) mælist um og rétt yfir umhverfismörkum I (0,5 µg/L) og breytist ekki milli ára. Sama máli gegnir um sínk (mynd 37B), nema í vatnsbólunni þar sem styrkurinn er rétt yfir umhverfismörkum I (5,0 µg/L). Styrkur kadmíums (mynd 37C) mælist að venju innan umhverfismarka I (0,01 µg/L) og greiningarmarka og hefur ekki breyst milli ára. Sama máli gegnir um styrk blýs (mynd 37D) þar sem styrkur er á öllum stöðum innan umhverfismarka I (0,2 µg/L). Styrkur króms (mynd 37E) hjá flestum mælist við eða rétt ofan umhverfismarka I (0,3 µg/L) en styrkurinn sem mælist við ÞR-9 var rétt yfir umhverfismörkum II (5,0 µg/L). Styrkur nikkels (mynd 37F) mælist alls staðar innan umhverfismarka I (0,7 µg/L). Frávik frá þessari meginreglu hafa aðeins komið fram í sýnum í vatnsbóli Þeistareykjaskála, sem er volgt gufuhitað vatn, en þar hafa ekki verið tekin sýni síðan 2018.

Tafla 18. Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum á Þeistareykjum 2021. Styrkur efna er í mg/L.

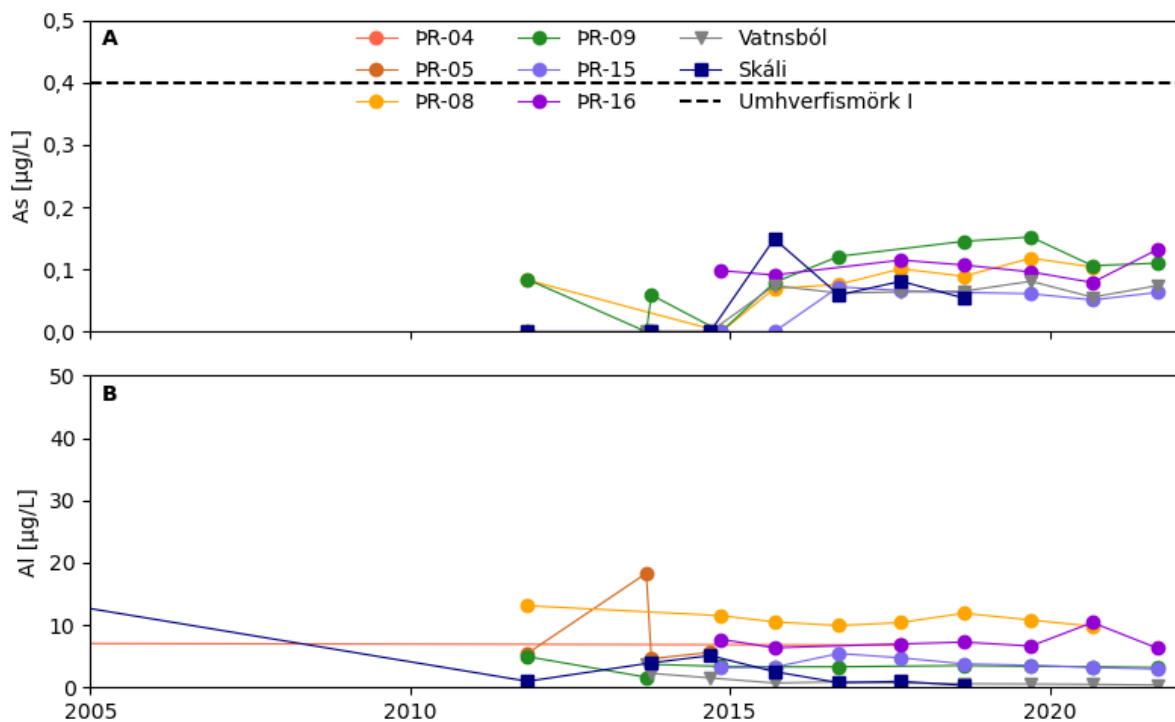
Staðarnafn	Vatnsból	ÞR-9	ÞR-15	ÞR-16
Staður	M-20409	B-60369	B-60376	B-60377
Dagsetning	2021-09-09	2021-09-09	2021-09-09	2021-09-09
Sýnanúmer	20210408	20210406	20210405	20210407
Hitastig (°C)	18,7	8,0	16,0	5,6
Sýrustig (pH/°C) - ÍSOR	6,46 / 21,8	7,97 / 21,6	7,97 / 21,7	8,64 / 21,7
Sýrustig (pH/°C) - Felt	6,36 / 18,7	8,03 / 8,0	8,06 / 16,0	8,64 / 5,6
Leiðni við 25°C (µS/cm)	258	117	164,9	93,4
Karbonsat (CO ₂)	161	30,8	44,5	25,9
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Bór (B)	<0,004	<0,004	0,0113	<0,004
Kísill (SiO ₂)	53,2	24,1	35,6	22,4
Natríum (Na)	16,8	11,0	14,5	8,64
Kalíum (K)	1,98	1,13	1,36	1,20
Magnesíum (Mg)	8,17	3,67	4,34	3,64
Kalsíum (Ca)	25,1	7,23	12,4	4,39
Flúoríð (F)	0,099	0,158	0,137	0,091
Klóríð (Cl)	5,42	5,80	7,76	5,28
Brómíð (Br)	0,011	0,016	0,022	0,014
Súlfat (SO ₄)	13,5	10,1	16,1	2,30
Ál (Al)	0,000375	0,00318	0,00294	0,00628
Arsen (As)	0,0000740	0,000110	0,0000631	0,000132
Baríum (Ba)	0,000946	0,0000711	0,000267	0,0000396
Kadmíum (Cd)	0,00000353	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Kóbalt (Co)	0,0000122	<0,000005	<0,000005	<0,000005
Króm (Cr)	0,0000778	0,000534	0,000508	0,000602
Kopar (Cu)	0,000234	0,000858	0,000234	0,00042
Járn (Fe)	0,00210	0,00106	0,00641	0,00126
Kvikasilfur (Hg)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Lítíum (Li)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Mangan (Mn)	0,000916	0,0000975	0,000381	0,0000381
Mólybden (Mo)	0,000102	0,000184	0,000245	0,000187
Nikkel (Ni)	0,000215	0,000168	0,0000810	0,0000580
Fosfór (P)	0,0433	0,0895	0,0572	0,0748
Blý (Pb)	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001
Strontíum (Sr)	0,0283	0,00784	0,0154	0,00478
Títan (Ti)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Vanadíum (V)	0,0103	0,0349	0,0158	0,0355
Sink (Zn)	0,00571	0,00270	0,00157	0,000595
Uppleyst steinefni (UE)	195	88	133	48
δD (‰ SMOW)	-71,5	-80,4	-75,1	-82,3
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-10,29	-11,50	-10,66	-11,81

Tafla 19. Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum í Kelduhverfi 2021. Styrkur efna er í mg/L.

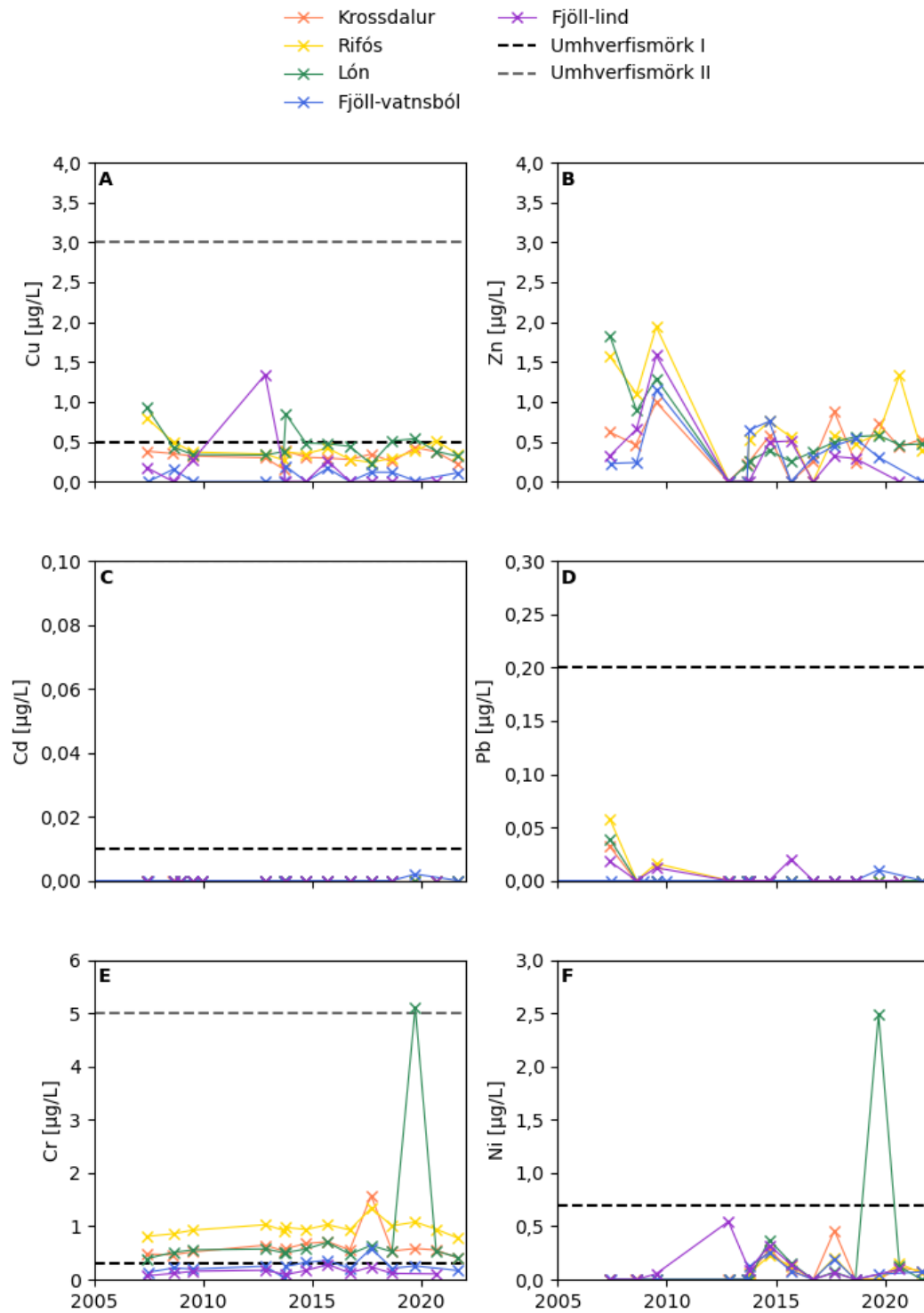
Staðarnafn	Fjöll, vatnsból	Rífós	Lón	Krossdalur
Staður	K-568	K-2743	K-2744	K-2745
Dagsetning	2021-09-08	2021-09-08	2021-09-08	2021-09-08
Sýnanúmer	20210404	20210402	20210403	20210401
Hitastig (°C)	3,6	11,0	5,0	4,4
Sýrustig (pH/°C) - ÍSOR	8,86 / 21,2	8,02 / 21,7	7,68 / 21,8	8,42 / 21,4
Sýrustig (pH/°C) - Felt	8,86 / 3,6	7,89 / 11,0	7,62 / 5,0	8,51 / 4,4
Leiðni við 25°C (µS/cm)	95,3	143	88,9	98,9
Karbonsat (CO ₂)	19,6	36,3	22,9	22,5
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Bór (B)	<0,004	0,00858	<0,004	<0,004
Kísill (SiO ₂)	12,0	29,7	20,7	21,6
Natríum (Na)	12,2	16,8	8,63	9,19
Kalíum (K)	0,116	1,45	0,893	0,846
Magnesíum (Mg)	0,405	3,76	2,73	2,82
Kalsíum (Ca)	6,89	6,86	4,48	5,97
Flúoríð (F)	0,021	0,155	0,096	0,171
Klóríð (Cl)	9,21	11,1	7,24	8,31
Brómíð (Br)	0,024	0,031	0,020	0,023
Súlfat (SO ₄)	3,18	9,95	3,14	5,33
Ál (Al)	0,00440	0,00435	0,00515	0,00536
Arsen (As)	0,0000922	0,000173	0,000112	0,0000596
Baríum (Ba)	<0,00001	0,00012	0,0000848	0,000107
Kadmíum (Cd)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Kóbalt (Co)	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005
Króm (Cr)	0,000169	0,000776	0,000415	0,000401
Kopar (Cu)	0,000112	0,000334	0,000316	0,000215
Járn (Fe)	0,000557	<0,0004	0,000411	0,000718
Kvikasilfur (Hg)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Lítíum (Li)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Mangan (Mn)	<0,00003	<0,00003	<0,00003	0,0000954
Mólybden (Mo)	0,0000892	0,000212	0,000185	0,000149
Nikkel (Ni)	0,0000716	0,0000598	<0,00005	0,0000811
Fosfór (P)	0,0186	0,0869	0,0646	0,0682
Blý (Pb)	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001
Strontíum (Sr)	<0,001	0,0112	0,00607	0,00842
Títan (Ti)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02
Vanadíum (V)	0,00724	0,000387	0,0207	0,0271
Sink (Zn)	<0,0002	<0,0006	0,000472	0,000531
Uppleyst steinefni (UE)	67	103	53	62
δD (‰ SMOW)	-70,9	-79,4	-76,8	-74,7
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-10,37	-11,32	-11,07	-10,78



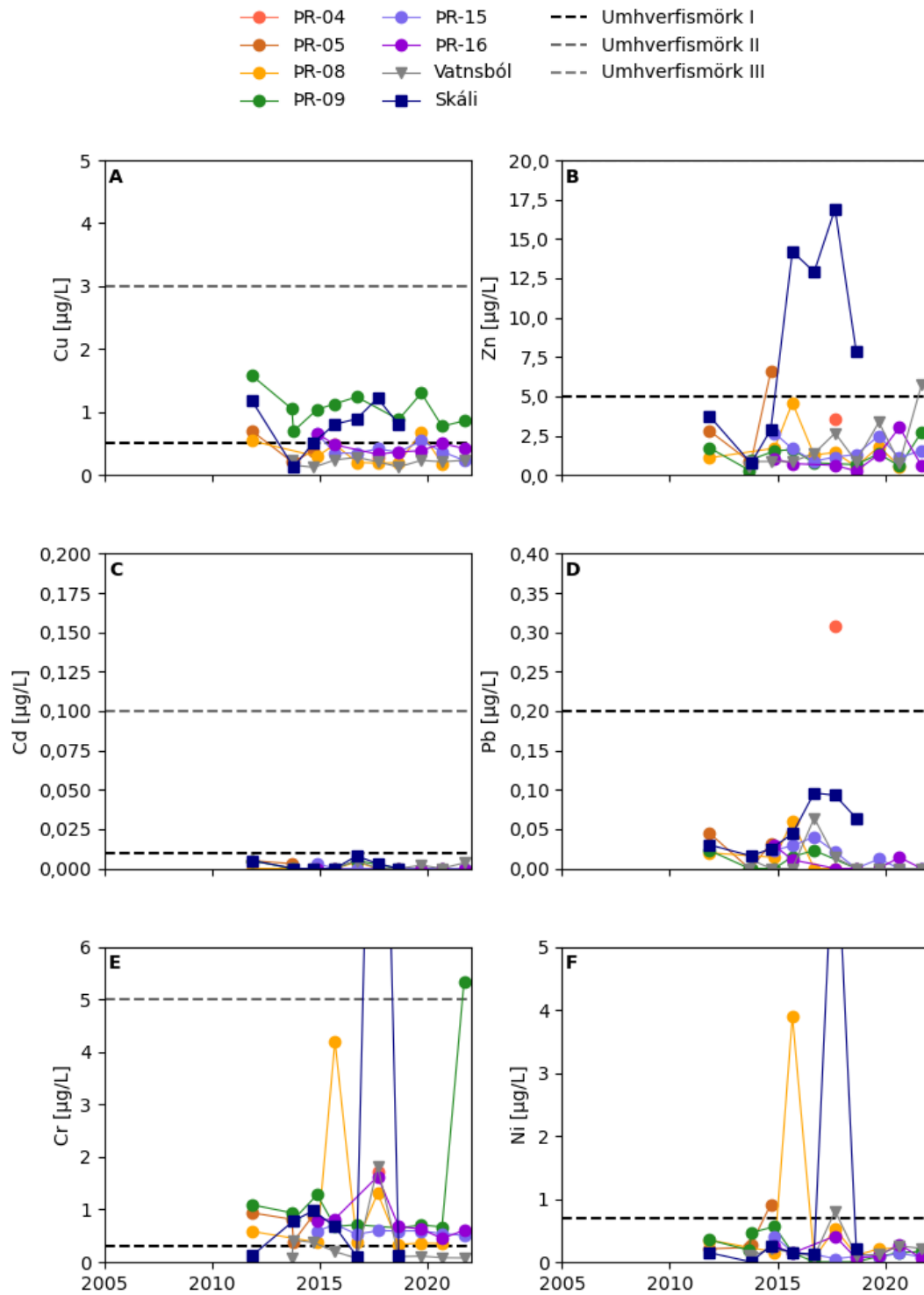
Mynd 34. Styrkur arsens (A) og áls (B) í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I. Viðmiðunarmörk fyrir neysluvatn (200 µg/L) falla utan kvarða myndar (B).



Mynd 35. Styrkur arsens (A) og áls (B) í vatni úr holum og lindum á Deistareykjum ásamt umhverfismörkum I. Viðmiðunarmörk fyrir neysluvatn (200 µg/L) falla utan kvarða myndar (B).



Mynd 36. Styrkur kopars (A), sínsks (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I og II.



Mynd 37. Styrkur kopars (A), sínks (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I, II og III.

3.2.1 Ferilefni í sýnum frá Þeistareykjum og Kelduhverfi

Að beiðni Landsvirkjunar var sýnum safnað á völdum stöðum til greininga á þeim tveimur ferilefnum sem sett voru ofan í niðurdælingarholur á Þeistareykjum í júní 2020. Um er að ræða 2,6-naftalendisúlfónat (2,6-NDS) og 2,7-naftalendisúlfónat (2,7-NDS). Einnig var skoðað hvort niðurbrotsefnið 2-naftalensúlfónat (2-NS) fyndist í sýnunum.

Valin voru sýnin fjögur frá Þeistareykjum auk sýnisins frá Rifósi í Kelduhverfi en það er heitast grunnvatnssýnanna þar og sýnir mest jarðhitamerki. Sýnin voru greind á vökvaskilju á rannsóknarstofu ÍSOR og niðurstöður eru skráðar í töflu 20. Því er skemmst frá að segja að ekkert ferilefnanna greindist í þeim sýnum sem skoðuð voru.

Tafla 20. Niðurstöður greininga á ferilefnum í sýnum frá Þeistareykjum og Kelduhverfi ($\mu\text{g/L}$).

Staður	Sýni	2,6-NDS	2,7-NDS	2-NS
Rifós	20210402	<0,05	<0,05	<0,05
ÞR-15	20210405	<0,05	<0,05	<0,05
ÞR-9	20210406	<0,05	<0,05	<0,05
ÞR-16	20210407	<0,05	<0,05	<0,05
Vatnsból	20210408	<0,05	<0,05	<0,05

3.3 Vísar og sjálfbærni

Landsvirkjun vinnur að sjálfbærni verkefni fyrir Norðausturland þar sem skilgreindir hafa verið vísar til vöktunar á sviði samfélags, umhverfis og efnahags.

Einn vísanna er gæði grunnvatns og hafa eftirtaldir staðir í Mývatnssveit, á Þeistareykjum og í Kelduhverfi verið valdir (Magnús Ólafsson og Ásgrímur Guðmundsson, 2017).

Mývatnssveit

Grjótagjá
Bjarg, volg lind við Mývatn
Langivogur, volg lind við Mývatn
Garðslind, köld lind við Mývatn
LUD-3, borhola í „Búrfellshrauni“
LUD-11, borhola í Hrossadal

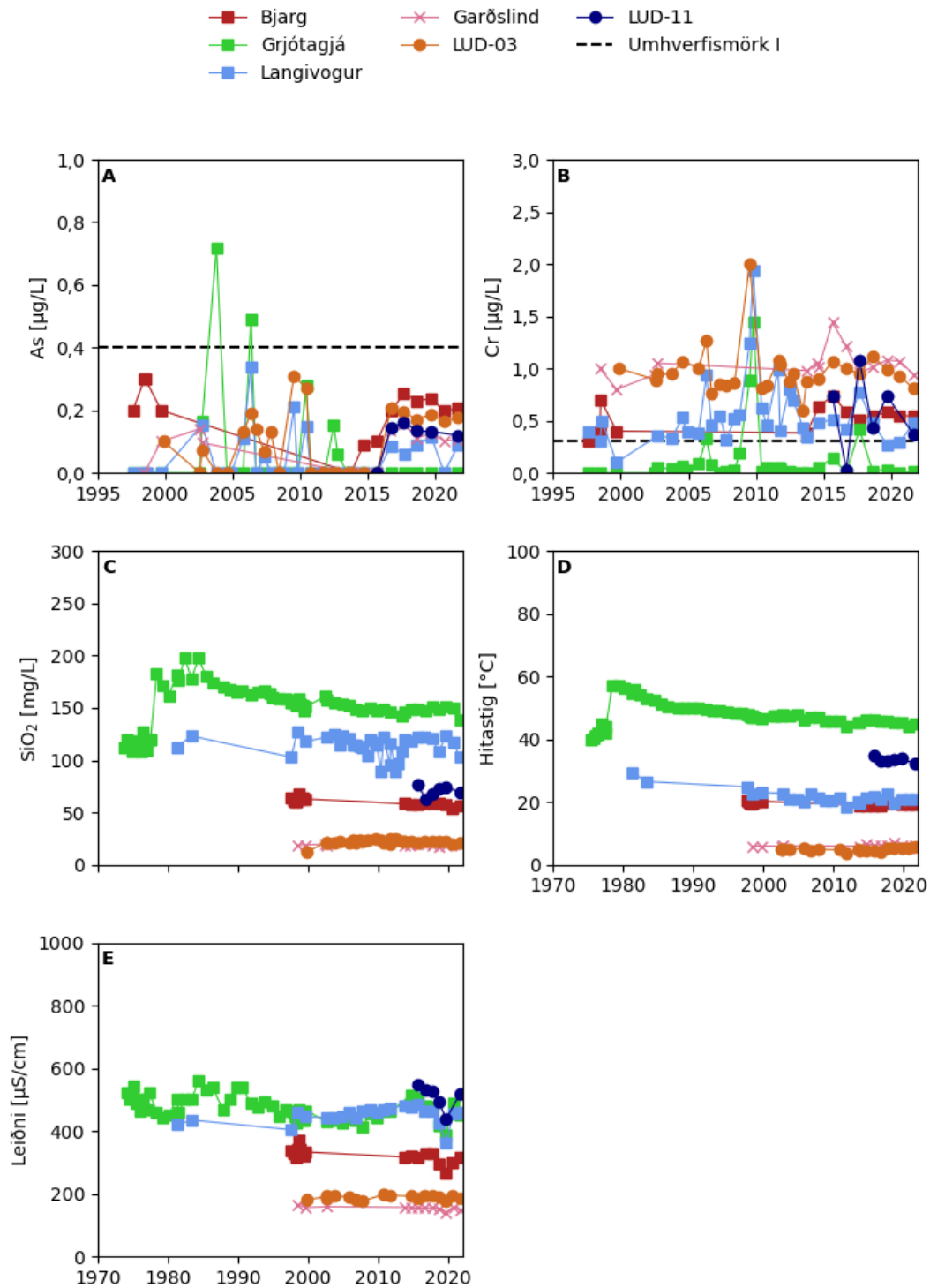
Þeistareykir og Kelduhverfi

Vatnsból við Ketilfjall
ÞR-9 – borhola á vatnstökusvæði virkjunar
ÞR-15 – borhola á „Reykjaheiði“
ÞR-16 – borhola
Fjöll – vatnsból bæjarins
Rifós – lind við seiðastöð

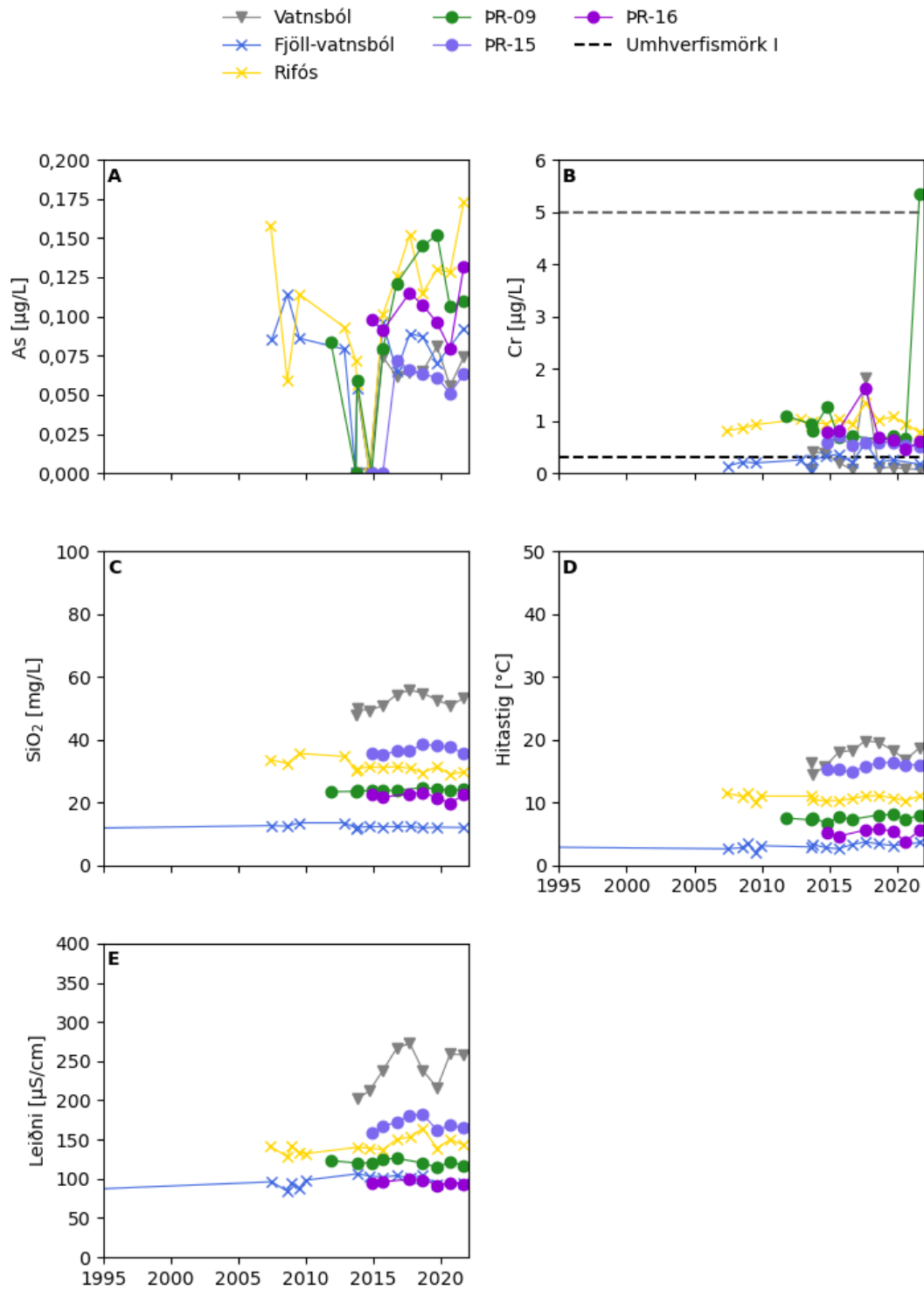
Eftirtalin efni og mæliþættir hafa verið valdir til að sýna niðurstöður fyrir ofangreinda staði:

Styrkur arsens (As)
Styrkur króms (Cr)
Styrkur kísils (SiO_2)
Mælt hitastig
Rafleiðni vatnsins

Niðurstöður mælinga og efnagreininga fyrir þá staði sem voru valdir eru sýndar á myndum 38 og 39. Árið 2019 voru rafleiðnigildi gegnumgangandi lægri en í fyrri mælingum en leiðnigildi fyrir 2020 og 2021 eru í takti við leiðnimælingar fyrri ára. Ástæðan fyrir þessu fráviki 2019 var að leiðnirafskautið virðist hafa skemmst, sennilega vegna kísilútfellinga.



Mynd 38. Styrkur arsens (A), króms (B), kísils (C), hitastig (D) og rafleiðni (E) á völdum stöðum í Mývatnssveit.



Mynd 39. Styrkur arsens (A), króms (B), kísils (C), hitastig (D) og rafleiðni (E) á völdum stöðum í Kelduhverfi og á Þeistareykjum.

4 Helstu niðurstöður

4.1 Gufuaugu

4.1.1 Þeistareykir

Sýnum var safnað úr fjórum gufuaugum á Þeistareykjum sumarið 2021. Ekki hafa verulegar breytingar sést á efnasamsetningu gufu á Þeistareykjum síðan 2012 þótt stöku sýni skeri sig úr, helst vegna þéttingar gufu eða loftmengunar. Í sýnum ársins má greina eftirfarandi:

- Styrkur H_2S og H_2 hefur farið nokkuð samfelld lökkandi í auga G-101 við sæluhúsið síðan 2017. Hugsanlegt er að þetta tengist þrýstingsniðurdætti vegna vinnslu.
- Styrkur H_2 í auga G-102 í Ketilfjalli hefur einnig heldur farið lökkandi undanfarin ár, en hækkar aftur svolítið í sýni ársins 2021. Súrefnissamsætur í gufunni eru ólíkar norðan og sunnan til í skálinni.
- Engar breytingar er að sjá milli ára fyrir G-103 við Tjarnarás.
- Sýni ársins úr auga G-109 á Röndum virðist hafa þétt á leið til yfirborðs.

Svæðið í Röndum er gassnaðara og reiknast mun kaldara en hin svæðin, eða um 250–280°C, samanborið við 300°C í Tjarnarási og á Þeistareykjagrundum og um 310°C í Ketilfjalli. Styrkur vetnis í gufunni hefur almennt verið frekar hár í Ketilfjalli, hærri en sem nemur jafnvægi við steindir í djúpkerfinu, en í Tjarnarási og á Röndum fellur vetnishiti ágætlega saman við aðra gashitamæla. Þessi háí vetnisstyrkur undir Ketilfjalli bendir til nálægðar við uppstreymi.

Tvívetnisgildi gufunnar spanna bilið -108 til -130‰, en allra lægstu gildin eru fyrir sýni sem greinilega hafa þétt á leið til yfirborðs. Tvívetnisgildin eru almennt hæst á Þeistareykjagrundum en lægst í Ketilfjalli. Gufan sem stígur upp af Þeistareykjagrundum, Tjarnarási og Röndum gæti verið mynduð við suðu á vökva líkum vökvanum í holu ÞG-1. Gufan í Ketilfjalli virðist hins vegar vera sömu ættar og vökvinn í holu ÞG-7 og gæti verið mynduð við suðu á honum.

4.1.2 Krafla

Sýnum var safnað úr þremur gufuaugum í Kröflu sumarið 2021. Um þau má segja eftirfarandi:

- Styrkur gass í gufu í auga G-104 í Leirhnjúki lækkar enn milli ára. Líklegast er að þetta tengist niðurdælingu í K-35.
- Engar breytingar eru greinanlegar milli ára fyrir auga G-106 í Suðurhlíðum.
- Gasstyrkur hækkar nokkuð milli ára í auga G-107 við Víti en sennilegt er að þar sé gufuþéttingu um að kenna.

Gufan sem stígur upp af hlíðum Kröflu og Vítissvæðinu er mun gasríkari en gufan í Leirhnjúki. Undanfarinn áratug hefur meðalgashiti reiknast 300–315°C í hlíðum Kröflu en heldur lægri í Leirhnjúki, um 290–295°C, en síðan 2019 hefur meðalgashiti í Leirhnjúki verið lægri en 280°C. Sennilegasta skýring þessa sú að niðurdæling í holu K-35 hafi valdið staðbundinni kólnun jarðhitakerfisins undir Leirhnjúki.

Samsætugildi í gufuaugum við Leirhnjúk eru býsna stöðug, með δD á bilinu -108 til -101‰ í flestum sýnum, og ekki er að sjá breytingu þar þótt gasinnihald gufunnar fari lökkandi. Flest sýnanna úr Suðurhlíðum hafa sömuleiðis verið á því bili. Sýni úr Vesturhlíðum eru sömuleiðis snauð að tvívetni, almennt með $\delta D \leq -114$ ‰, en sýnin sem safnað er norðan Vítis eru áberandi þyngst, með $\delta D > -100$ ‰. Ætla má að gufa á Vítissvæðinu sé tilkomin við suðu gufuhitaðs

grunnvatns, gufan í Suðurhlíðum og Leirhnjúki gæti annaðhvort verið mynduð við slíka suðu eða soðin upp af grunnvatni sem sýður við 100°C.

4.1.3 Námafjall

Sýnum var safnað úr þremur gufuaugum í Námafjalli sumarið 2021. Af þeim sést eftirfarandi:

- Hækkaður styrkur allra gastegundar í sýni úr auga G-105 í Bjarnarflagi bendir til að gufan hafi þétt á leið til yfirborðs. Gufuvirkni þar virtist enda með minna móti.
- Litlar breytingar sjást milli ára fyrir auga G-106 á Hverum.
- Efnasamsetning gufu úr auga G-109 vestan Syðstu-Kollu breytist lítið milli ára.

Talsverður innbyrðis munur er milli þeirra þriggja svæða í Námafjallskerfinu þar sem gufuvirkni á yfirborði er nægilega mikil til að ná megi sýnum af gufunni. Djúphiti reiknast lægstur í Bjarnarflagi, nærri 230°C, en hækkar eftir því sem austar dregur, er um 300°C á Námafjalli sjálfu og um 320°C á Hverum. Hár vetnisstyrkur gefur til kynna að nokkur djúpgufa sé til staðar undir Námafjalli og Hverum en vetnisstyrkur í Bjarnarflagi er í samræmi við það sem vænta má miðað við að jarðhitavökvinn sé í jafnvægi við berg.

Munur undirsvæðanna þriggja sést einnig í samsætugildunum. Þau benda til þess að gufan í Bjarnarflagi sé mynduð við suðu á grunnvatni eða blöndu djúpvatns og grunnvatns en gufan á hrygg Námafjalls sé mynduð við suðu á jarðhitavökva líkum þeim sem hola B-11 gefur. Samsætuhlutföll gufunnar í Hverum eru hins vegar talsvert frábrugðin því sem vænta má fyrir gufu myndaða við suðu djúpvökva úr vinnsluholum í Bjarnarflagi. Það gæti bent til þess að annað vökvakerfi liggi undir austasta hluta yfirborðsvirkinnar á Námafjallssvæðinu.

4.2 Grunnvatn

4.2.1 Mývatnssveit

Á árinu 2021 fór sýnataka á grunnvatni fram í ágúst og september og var alls safnað vatni til efnagreininga á 18 vöktunarstöðum. Að ósk Landsvirkjunar voru sýni hvorki tekin úr holu LUD-5 né lind við Hverfjallsgjá. Dælan í holu LUD-11 sló ítrekað út rafstöðinni en sýni náðist samt.

Nokkrar breytingar eru á styrk arsens milli árána 2020 og 2021. Í Bjarnarflagsslóni var styrkur arsens 131 µg/L sem er enn yfir umhverfismörkum IV en þó lægri en undanfarin ár. Í vatni frá skiljustöðinni í Kröflu hefur styrkurinn lækkað í 29,2 µg/L, sem er aðeins lægra en undanfarin ár en samt yfir umhverfismörkum III sem eru 15 µg/L. Í LUD-4 er styrkur arsens innan umhverfismarká II og hefur verið lægri en 4 µg/L frá árinu 2019. Styrkur arsens í vöktunarholum, öðrum en LUD-4, og heitum og köldum lindum og gjám í Mývatnssveit fellur í öllum tilfellum nálægt eða innan umhverfismarká I ($\leq 0,4$ µg/L). Styrkur arsens mælist innan greiningarmarká í Grjótagjá, Vogagjá og Langavogi.

Styrkur áls í Bjarnarflagsslóni (1380 µg/L) og LUD-4 (137 µg/L) mældist svipaður árin 2020 og 2021. Styrkur áls hækkar í vatni frá skiljustöðinni í Kröflu (1760 µg/L) og Hlíðardalslæk (254 µg/L). Vatn úr öllum vöktunarholum, lindum og gjám er undir hámarksgildi fyrir drykkjarvatn (200 µg/L). Styrkur áls hefur hækkað á þremur vöktunarstöðum, Grjótagjá, Vogagjá og Langavogi, og ber að fylgjast með þeirri framvindu.

Líkt og í umhverfisvöktunarskýrslum undanfarinna ára eru sýndar myndir með niðurstöðum efnagreininga fyrir kopar, sínk, kadmíum, blý, króm og nikkell en þessi efni auk arsens eru sérstaklega tilgreind í reglugerð um varnir gegn mengun vatns frá 1999. Heilt yfir er styrkur

Þessara efna lágur og oft nærri greiningarmörkum efnagreiningaraðferðanna. Þó má sjá að styrkur síns hefur hækkað upp að umhverfismörkum I (5 µg/L) í tveimur volgum lindum við Mývatn, þ.e. Bjargi og Helgavogi.

4.2.2 Þeistareykir og Kelduhverfi

Grunnvatn á Þeistareykjum og í Kelduhverfi er vaktað á sama hátt og í Mývatnssveit. Djúpdælar eru í eftirlits- og vinnsluholum. Sýnataka fór fram í september 2021 og voru sýni tekin á fjórum stöðum á Þeistareykjum og fjórum stöðum í Kelduhverfi. Að ósk Landsvirkjunar var ekki tekið sýni úr vatnsbóli við Fjöll í Kelduhverfi að þessu sinni, auk þess sem sýnatöku við Þeistareykjaskála var sleppt. Rafstöð frá Þeistareykjum var notuð til að dæla úr grunnvatnsholunum og var ekki hægt að aka henni nógu nálægt holu ÞR-8 til að taka sýni.

Styrkur arsens er á öllum vöktunarstöðum innan við umhverfismörk I ($\leq 0,4$ µg/L) og styrkur áls er innan við hámarksgildi fyrir neysluvatn (200 µg/L). Líkt og fyrir vöktunarstaði í Mývatnssveit eru sýndar myndir með niðurstöðum efnagreininga fyrir kopar, sínk, kadmíum, blý, króm og nikkell en þessi efni auk arsens eru sérstaklega tilgreind í reglugerð um varnir gegn mengun vatns frá 1999. Heilt yfir er styrkur þessara efna almennt lágur og oft nærri greiningarmörkum efnagreiningaraðferðanna, sem endurspeglast að einhverju leyti í óreglulegum sveiflum í styrk efnanna.

5 Heimildaskrá

- Albert Þorgersson, Gunnlaugur M. Einarsson, Auður Agla Óladóttir, Deirdre Clark, Heimir Ingimarsson og Finnbogi Óskarsson (2020). *Háhitavæðin á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2020*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2020/053, Landsvirkjun, LV-2020-055, 88 bls.
- Ásgrímur Guðmundsson, Bjarni Gautason, Christian Lacasse, Guðni Axelsson, Gunnar Þorgilsson, Halldór Ármannsson, Helga Tulinius, Kristján Sæmundsson, Ragna Karlsdóttir, Snorri Páll Kjarran, Sveinn Óli Pálmarrsson, Sæunn Halldórsdóttir og Þorsteinn Egilsson (2008). *Hugmyndalíkan jarðhitakerfisins á Þeistareykjum og jarðvarmamát með rúmmálsaðferð*. Íslenskar orkurannsóknir, Mannvit og Verkfræðistofan Vatnaskil, ÍSOR-2008/024.
- Branson, E. (1993). Environmental Aspects of Aquaculture. Í *Aquaculture for Veterinarians, Fish Husbandry and Medicine*. (Ed. Lydia Brown).
- Craig, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1072–1703.
- Darling, W.G. og Ármannsson, H. (1989). Stable Isotopic Aspects of Fluid Flow in the Krafla, Námafjall and Theistareykir Geothermal Systems of Northeast Iceland. *Chem. Geol.*, 1989, 76, 197–213.
- Eydís S. Eiríksdóttir og Svava B. Þorlákssdóttir (2021). *Efnasamsetning, rennsli og aurburður vaktæðra straumvatna á Suðurlandi. Niðurstöður ársins 2020*. Hafrannsóknir, HV 2021-33.
- Finnbogi Óskarsson (2012a). *Niðurstöður efnagreininga á sýnum úr holum B-13 og B-14*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-12054.
- Finnbogi Óskarsson (2018). *Grunnvatn í Mývatnssveit. Stöðugar samsætur vatns og uppleystra efna*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2018/067, Landsvirkjun, LV-2018-076, 29 bls.
- Finnbogi Óskarsson (2019). *Þeistareykir. Stöðugar samsætur vetnis og súrefnis í vatni og gufu*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2019/037 (LV-2019-042), 18 s. Unnið fyrir Landsvirkjun.
- Finnbogi Óskarsson og Auður Agla Óladóttir (2020). *Leirhnjúkur. Gasstyrkur í gufu og gasflæði um jarðveg*. Íslenskar orkurannsóknir, greinargerð ÍSOR-20041, 14 bls.
- Finnbogi Óskarsson, Magnús Ólafsson og Sigurður G. Kristinsson (2019). *Háhitavæðin á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2019*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2019/077, Landsvirkjun, LV-2019-081, 104 bls.
- Gadalia, A., Gylfi Páll Hersir og Finnbogi Óskarsson (2016). *IMAGE – Task 4.5. Tracer test at Krafla high-temperature geothermal field June 21st – August 17th 2016*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2016/079. 44 bls. + viðaukar.
- Gestur Gíslason, Gunnar Johnsen, Halldór Ármannsson, Helgi Torfason og Knútur Árnason (1984). *Þeistareykir – Yfirborðsrannsóknir á háhitavæðinu*. Orkustofnun, OS-84089/JHD-16. 134 bls. + 3 kort.
- Halldór Ármannsson (1993). *Jarðhitakerfið í Námafjalli. Efnafræðileg úttekt*. Samvinnuverkefni Landsvirkjunar og Orkustofnunar. Orkustofnun, OS-93053/JHD-29 B, 30 bls.
- Halldór Ármannsson (2003). *Förgun affallsvatns frá Kröflu- og Bjarnarflagsvirkjunum*. Orkustofnun, OS-2003/032, 32 bls.

- Halldór Ármannsson (2004). Chemical aspects of exploration of the Theistareykir high-temperature geothermal area, NE Iceland. Í Wanty, R. B. og Seal, R. R. (ritstj.) *Water-Rock Interaction*, 63–67.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2002). Efnarannsóknir á vatni úr holum, lindum og gjám í Búrfellshrauni og nágrenni. Undirstöður vöktunar vegna affalls frá jarðhitavirkjunum, Kröflu og Námafjalli. Orkustofnun, OS-2002/076, 36 s. Unnið fyrir Landsvirkjun.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2004). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2003*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2004/005, Landsvirkjun, LV-2004/052, 14 bls.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2005). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2004*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2005/006, Landsvirkjun, LV-2005/025, 15 bls.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2006a). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2005*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2006/013, Landsvirkjun, LV-2005/064, 15 bls.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2006b). *Collection of geothermal fluids for chemical analysis*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2006/016, 16 bls.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2007). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2006*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2007/003, Landsvirkjun, LV-2007/007, 14 bls.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2012). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2011*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2012/006; Landsvirkjun, LV-2012/021, 17 bls.
- Halldór Ármannsson, Magnús Ólafsson og Ester Eyjólfsdóttir (2010). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2009*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2010/018, Landsvirkjun, LV-2010/055, 16 bls.
- Halldór Ármannsson, Magnús Ólafsson og Hörður Tryggvason (2011). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2010*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2011/007, Landsvirkjun, LV-2011/027, 15 bls.
- Halldór Ármannsson, Magnús Ólafsson og Mozhgan Bagheri (2008). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2007*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2009/011, Landsvirkjun, LV-2008/064, 12 bls.
- Halldór Ármannsson, Magnús Ólafsson, Mozhgan Bagheri og Auður Ingimarsdóttir (2009). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2008*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2008/018, Landsvirkjun, LV-2009/020, 15 bls.
- Halldór Ármannsson og Trausti Hauksson (1980). *Krafla. Samsetning gass í gufuaugum*. Orkustofnun, OS-80027/JHD-16, 51 bls.
- Horita, J. og Wesolowski, D. J. (1994). Liquid-vapor fractionation of oxygen and hydrogen isotopes of water from the freezing to the critical temperature. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 3425–3437

- Hrefna Kristmannsdóttir (2010). *Grunnvatnsrannsóknir í Norðurþingi 2007–2009*. Landsvirkjun, LV-2011/074, 50 bls.
- Jarðboranir ríkisins (1951). *Efnagreiningar á hverum og laugum*. Jarðboranir Ríkisins, Reykjavík, 88 bls.
- Jón Benjamínsson (1985). *Krafla. Samanburður á gasi gufuaugna milli árána 1979 og 1984/1985*. Orkustofnun, OS-85075/JHD-26 B, 28 bls.
- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (1998). *Kröflusvæði og Námafjall. Yfirborðsathuganir og efnagreiningar haustið 1997. Yfirlit um Kröflusvæðið*. Landsvirkjun – Kröflustöð, 104 bls.
- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (2009). *Kröflusvæði og Bjarnarflag. Umhverfisvöktun árið 2008*. Landsvirkjun – Kröflustöð, LV-2009/141, 39 bls.
- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (2011). *Kröflusvæði og Bjarnarflag. Umhverfisvöktun 2011*. Landsvirkjun, LV-2011/119, 37 bls.
- Magnús Ólafsson og Ásgrímur Guðmundsson (2017). *Vöktunarstaðir í Mývatnssveit, á Þeistareykjum og í Kelduhverfi*. Íslenskar orkurannsóknir, minnisblað, 20. desember 2017.
- Magnús Ólafsson, Gunnar Þorgilsson og Finnbogi Óskarsson (2020). *Ferilpróf frá holu LUD-12 í Mývatnssveit. Könnun á afdrifum affallsvatns frá Jarðböðunum*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2020/017, 39 bls.
- Pope, E. C., Bird, D. K., Arnórsson, S. og Giroud, N. (2016). Hydrogeology of the Krafla geothermal system, northeast Iceland. *Geofluids*, 16, 175–197.
- Reglugerð um neysluvatn nr. 536/2001.*
- Reglugerð um varnir gegn mengun vatns nr. 796/1999.*
- Sigurður G. Kristinsson, Finnbogi Óskarsson, Auður Agla Óladóttir og Magnús Ólafsson (2015). *Háhitavæðin á Þeistareykjum í Kröflu og Námafjalli. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2015*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2015/059, Landsvirkjun, LV-2015-125, 175 bls.
- Sigurður G. Kristinsson, Finnbogi Óskarsson, Auður Agla Óladóttir og Magnús Ólafsson (2016). *Háhitavæðin í Námafjalli, Kröflu og á Þeistareykjum. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2015*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2016/080, Landsvirkjun, LV-2016-124, 157 bls.
- Sigurður G. Kristinsson, Finnbogi Óskarsson, Auður Agla Óladóttir og Magnús Ólafsson (2017). *Háhitavæðin í Kröflu, Námafjalli og á Þeistareykjum. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2017*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2017/086, Landsvirkjun, LV-2017-123, 178 bls.
- Sigurður G. Kristinsson, Finnbogi Óskarsson, Auður Agla Óladóttir og Magnús Ólafsson (2018). *Háhitavæðin á Þeistareykjum í Kröflu og Námafjalli. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2015*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2018/069, Landsvirkjun, LV-2018-090, 168 bls.
- Sigurður G. Kristinsson, Finnbogi Óskarsson, Magnús Ólafsson og Auður Agla Óladóttir (2014). *Háhitavæðin í Kröflu, Námafjalli og á Þeistareykjum. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2014*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2014/058, Landsvirkjun, LV-2014-132, 173 bls.

- Sigurður G. Kristinsson, Finnbogi Óskarsson, Magnús Ólafsson, Auður Agla Óladóttir, Hörður H. Tryggvason og Þráinn Friðriksson (2013a). *Háhitavæðin í Námafjalli, Kröflu og á Þeistareykjum. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2013*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2013/060, Landsvirkjun, LV-2013-132, 160 bls.
- Sigurður G. Kristinsson, Þráinn Friðriksson, Magnús Ólafsson, Sveinborg Hlíf Gunnarsdóttir og Steinþór Niélsson (2013b). *Háhitavæðin á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2013/037, Landsvirkjun, LV-2013-091, 152 bls.
- Stefán Arnórsson og Hörður Svavarsson (1985). Application of chemical geothermometry to geothermal exploration and development. *Geothermal Resource Council Transactions*, 9, 293–298.
- Stefán Arnórsson, Kristján Geirsson, Þráinn Friðriksson og Andri Stefánsson (1995). *Krafla og Námafjall. Gas í borholum og gufuaugum*. Raunvísindastofnun Háskólans, RH 18-95, 14 bls.
- Stefán Arnórsson, Þráinn Friðriksson og Ingvi Gunnarsson (1996). *Krafla og Námafjall. Skýrsla um athuganir á gasi í borholum og gufuaugum á árunum 1995 og 1996*. Raunvísindastofnun Háskólans, RH 12-96, 11 bls.
- Stefán Arnórsson, Þráinn Friðriksson og Ingvi Gunnarsson (1998). Gas chemistry of the Krafla geothermal field. Í G. B. Arehart og J. R. Hulston (ritstj.) *Water-Rock Interaction*. Balkema, Rotterdam, 613–616.
- Umhverfisstofnun (2014). *Breytingartillaga að vöktun grunnvatns á Mývatnssvæði*. Bréf dags. 12. júní 2014. Tilvísun: UST20140500178/döhþ

Viðauki: Sýnameðhöndlun og efnagreiningaraðferðir

Gufusýni

Ósúrt gas (H₂, CH₄, N₂, O₂, Ar): Sýnum er safnað yfir lút (50 mL af 10 M NaOH) í lofttæmdar glerflöskur og þau greind með gasskilju. Gasstyrkur er reiknaður út frá þrýstingi sýnis, flatarmáli toppa á rófinu og flatarmáli tilsvarenda toppa fyrir róf af staðalgasi.

Koldíoxíð (CO₂): Sýnum er safnað í lút í lofttæmdar glerflöskur og þau greind með titrun með HCl frá pH 8,2 niður í pH 3,8. Leiðrétt er fyrir styrk CO₂ í blindsýnum og styrk H₂S.

Brennisteinsvetni (H₂S): Sýnum er safnað í lút í lofttæmdar glerflöskur og þau títruð með kvikasilfursasetati þar sem dithizone í acetoni er notað sem litvísir.

Vatns- og þéttivatnssýni

Sýrustig (pH): Sýrustig er mælt með spennumælingu yfir rafskaut, bæði strax við söfnun og einnig á rannsóknarstofu ÍSOR samhliða karbónatgreiningu.

Karbónat (CO₂): Sýnum er safnað á loftþéttar glerflöskur og þau greind með titrun með HCl frá pH 8,2 niður í pH 3,8 og baktitrun með NaOH frá pH 3,8 upp í pH 8,2 eigi síðar en tveimur sólarhringum eftir söfnun. Leiðrétt er fyrir klofnun H₂S, H₂O og fleiri daufra sýra.

Brennisteinsvetni (H₂S): Greint strax við söfnun. Títrað með kvikasilfursasetati í basískri lausn með dithizone í acetoni sem litvísi.

Rafleiðni: Mæld með spennumælingu, bæði strax við söfnun og einnig á rannsóknarstofu ÍSOR samhliða karbónatgreiningu. Leiðnigildi við stofuhita eða söfnunarhita eru umreiknuð og gefin upp við 25°C.

Kísill (SiO₂), bór (B), aðalmálmur (Na, K, Mg, Ca), Li og Ti: Sýnin eru síuð (0,2 µm) við söfnun, þau sett á plastflöskur og sýrð (1%) með saltpéturssýru (*suprapur*). Greining með rafgasgreiningum (ICP-OES) á rannsóknarstofu ÍSOR.

Hliðarmálmur og snefilefni (Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Mo, Ni, Pb, Sr, Zn): Sýni síuð (0,2 µm) við söfnun, þau sett á sýruþvegnar plastflöskur og sýrð með saltpéturssýru (*suprapur*). Greining með rafgasgreiningum (ICP-MS) á rannsóknarstofu ALS í Svíþjóð.

Kvikasilfur (Hg): Sýni eru síuð (0,2 µm) við söfnun, þau sett á sýruþvegnar plastflöskur og þau sýrð með saltpéturssýru (*suprapur*). Greining með atómflúrljómun (AFS) á rannsóknarstofu ALS í Svíþjóð.

Anjónir (F, Cl, Br, SO₄): Sýni eru síuð (0,2 µm) við söfnun og geymd á plastflöskum. Þar sem styrkur H₂S er hærri en 1 mg/L er ZnS fellt úr lausninni við söfnun. Greining með jónaskiljun (IC) á rannsóknarstofu ÍSOR.

Næringarefni (NO₃-N, NO₂-N, NH₄-N, N_{heild}, PO₄-P, P_{heild}): Síuðum sýnum er safnað á plastflöskur og þær geymdar í frysti. Greining á sjálfvirkum litrófsmæli (autoanalyzer) á rannsóknarstofu ALS í Svíþjóð.

Uppleyst steinefni (TDS): Sýni eru síuð (0,2 µm) á plastflöskur við söfnun og greind á rannsóknarstofu ÍSOR. 100 mL sýnis eru þurreimaðir og heildarmagn uppleystra steinefna ákvarðað út frá massa þurrefnis.

Samsætur (δD og $\delta^{18}O$): Síuðum sýnum er safnað á loftþéttar glerflöskur og hlutfall þungra og létttra samsætna ákvarðað á massagreini hjá Isotech Laboratories í Bandaríkjunum. Samsætuhlutföll eru gefin upp sem ‰-vik frá sömu hlutföllum í staðalsjó (V-SMOW).