



Landsvirkjun

LV-2019-0ym

Háhitasvæðin á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli

Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2019

Háhitasvæðin á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli

Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2019



ÍSOR-2019/077

Verknr.: 19-0131

Desember 2019

Lykilsíða



Skýrsla LV nr.:	LV-2019-081	Dags:	Desember 2019
Fjöldi síðna: 104	Upplag: 3	Dreifing:	☒ Birt á vef LV ☒ Opin ☐ Takmörkuð til
Titill:	Háhitasvæðin á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli. Vöktun á yfirborðs- virkni og grunnvatni árið 2019		
Höfundar/fyrirtæki:	Finnbogi Óskarsson, Magnús Ólafsson og Sigurður G. Kristinsson		
Verkefnisstjóri:	Ásgerður K. Sigurðardóttir f.h. LV	Sigurður G. Kristinsson f.h. ÍSOR	
Unnið fyrir:	Unnið af Íslenskum orkurannsóknum fyrir Landsvirkjun		
Samvinnuaðilar:			

Útdráttur:

Jarðhitavirkni á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli hefur verið kortlögð og könnuð reglulega á síðustu áratugum. Tilgangurinn er að fylgjast með breytingum á virkninni. Árið 2019 var ekki lögð sérstök áhersla á eitt þessara þriggja svæða heldur umfang eftirlitsins minnkað og einskorðað við sýnatöku úr gufuaugum og grunnvatnseftirlit eins og áður. Yfirborðsvirkni var aðeins skoðuð á Þeistareykjum og aðallega nýleg virkni á svæðunum við Bæjarfjall og Ketilfjall. Þrátt fyrir þessar breytingar á yfirborðsvirkni á Þeistareykjum breytist gassamsetning í gufuaugum lítið. Þó má merkja að vetnisstyrkur fer nokkuð lækkandi í gufu í Ketilfjalli og hlutur þungs súrefnis (^{18}O) í gufunni hefur minnkað nokkuð frá því að vinnsla hófst. Í Námafjalli og Kröflu var yfirferðin lauslegri en þar voru einnig teknar hitamyndir af yfirborðsjarðhitnum og sýni tekin úr gufuaugum og borin saman við fyrri mælingar. Óverulegar breytingar voru í jarðhitavirkni á svæðunum frá 2017 og fremur litlar breytingar eru á efnasamsetningu gufunnar milli ára.

Grunnvatn í Mývatnssveit er kannað árlega og var svo einnig gert 2019 í þeim tilgangi að meta áhrif frá affallsvatni frá Kröflu- og Bjarnarflagsvirkjunum. Í skýrslunni er einnig gerð grein fyrir athugunum á efnasamsetningu grunnvatns í Þeistareykjasprungusveiminum í Kelduhverfi. Vöktunin 2019 sýnir engar meiri háttar 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.

Lykilorð:

Þeistareykir, Krafla, Námafjall, Bjarnarflag, Mývatnssveit, Kelduhverfi, yfirborðsvirkni, gufusýni, gasflæðimælingar, grunnvatn, hitamyndir, Landsvirkjun, ÍSOR

ISBN nr.:

Samþykki verkefnisstjóra
Landsvirkjunar

Undirskrift verkefnisstjóra

Sigurður G. Kristinsson

Yfirfarið

Auður Agla Óladóttir

Efnisyfirlit

1	Inngangur	11
2	Þeistareykir	13
2.1	Yfirborðsvirkni á Þeistareykjum	13
2.1.1	Misgengi suðvestan Randa og jarðhitinn við Hitur	15
2.1.2	Randir	16
2.1.3	Tjarnarás	19
2.1.4	Bæjarfjall	21
2.1.5	Ketilfjall	26
2.1.6	Niðurstöður	29
2.2	Efnasamsetning gufu úr gufuaugum á Þeistareykjum	30
2.2.1	Sýnatökustaðir á Þeistareykjum	30
2.2.2	Niðurstöður gufuefnagreininga	34
2.2.3	Samantekt	39
3	Krafla	41
3.1	Efnasamsetning gufu úr gufuaugum í Kröflu	41
3.1.1	Sýnatökustaðir í Kröflu	41
3.1.2	Niðurstöður gufuefnagreininga	44
3.1.3	Samantekt	48
4	Námafjall	50
4.1	Efnasamsetning gufu úr gufuaugum í Námafjalli	50
4.1.1	Sýnatökustaðir	50
4.1.2	Niðurstöður gufuefnagreininga	53
4.1.3	Samantekt	58
5	Vöktun grunnvatns í Mývatnssveit, á Þeistareykjum og í Kelduhverfi	59
5.1	Mývatnssveit	59
5.2	Næringarefni í sýnum úr Mývatnssveit	68
5.4	Vísar og sjálfbærni	91
6	Helstu niðurstöður	95
6.1	Þeistareykir	95
6.2	Krafla	96
6.3	Námafjall	96
6.4	Niðurstöður - Grunnvatn	97
6.4.1	Mývatnssveit	97
6.4.2	Þeistareykir og Kelduhverfi	97
7	Heimildaskrá	98
	Viðauki 1: Sýnameðhöndlun og efnagreiningaraðferðir	102
	Viðauki 2: Gasflæði (CO₂) um jarðveg	104

Töflur

Tafla 1. Sýnatökustaðir á Þeistareykjum sumarið 2019	30
Tafla 2. Efnasamsetning gufusýna frá Þeistareykjum sumarið 2019	35
Tafla 3. Reiknaður efnahiti (°C) gufusýna árunna 2012–2019 frá Þeistareykjum.....	37
Tafla 4. Sýnatökustaðir í Kröflu sumarið 2019	41
Tafla 5. Efnasamsetning gufusýna úr Kröflu sumarið 2019.....	45
Tafla 6. Reiknaður efnahiti (°C) gufusýna árunna 2012–2019 af Kröflusvæðinu	47
Tafla 7. Sýnatökustaðir í Námafjalli sumarið 2019	50
Tafla 8. Efnasamsetning gufusýna frá Námafjallssvæðinu sumarið 2019.....	54
Tafla 9. Reiknaður efnahiti (°C) gufusýna árunna 2012–2019 frá Námafjallssvæðinu.....	55
Tafla 10. Vöktunarstaðir í Mývatnssveit 2019	60
Tafla 11. Yfirlit um dælt magn við sýnatöku 2019 úr vöktunarholum í Mývatnssveit	60
Tafla 12. Umhverfismörk fyrir málma í yfirborðsvatni til verndar lífríki.....	61
Tafla 13. Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum haustið 2019	65
Tafla 14. Niðurstöður efnagreininga á næringarefnum í sýnum úr Mývatnssveit (mg/L).....	68
Tafla 15. Sýnatökustaðir á Þeistareykjum og í Kelduhverfi 2019	80
Tafla 16. Yfirlit um dælt magn við sýnatöku 2019 úr vöktunarholum á Þeistareykjum	80
Tafla 17. Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum á Þeistareykjum 2019	83

Myndir

Mynd 1. Yfirlitskort af þeim svæðum sem fjallað er um í skýrslunni.....	12
Mynd 2. Jarðhitakort af Þeistareykjum	14
Mynd 3. Gufustreymi við Hitur. Hiti mældist 95°C, sem er svipað og var árið 2018	15
Mynd 4. Randir. Myndin er tekin ofan af Bæjarfjalli	16
Mynd 5. Hitamyndir teknar ofan af Bæjarfjalli vestanverðu.....	17
Mynd 6. Framhald hitamynda (á mynd 5).....	18
Mynd 7. Virknin á Tjarnarási teygir sig að Bæjarfjalli í suðri en þar er meginvirknin	19
Mynd 8. Skellan við sýnatökustað ÞG-103.....	20
Mynd 9. Hitamyndir. Myndatökustaður 2 á mynd 2.....	20
Mynd 10. Jarðhitavirknin neðan við sæluhúsið	21
Mynd 11. Jarðhitinn á sléttunni neðan við Bæjarfjall norðanvert.....	22
Mynd 12. Framhald til austurs af mynd 13. Neðri-Bóndhóll er á miðri mynd	22
Mynd 13. Jarðhitinn við norðanvert Bæjarfjall.....	24
Mynd 14. Hitamyndir af norðurhlíð Bæjarfjalls.....	25
Mynd 15. Jarðhitaálinn í miðjum hlíðum Ketilfjalls	26
Mynd 16. Jarðhitinn norðan við holur ÞG-3, ÞG-6 og ÞG-7	27
Mynd 17. Nýtt gufuauga og sölnaður gróður neðan við skálina í Ketilfjalli.....	28
Mynd 18. Sölnaður gróður, ný niðurföll, bullandi leirhverir, heit jörð og gufur eru enn að koma í ljós norðan við skelluna í Ketilfjalli.....	28
Mynd 19. Svæðið sunnan við holur ÞG-3, ÞG-6 og ÞG-7	29

Mynd 20. Gufuaugu á Þeistareykjum.....	31
Mynd 21. Gufuaugað Þ G-101 í gili sunnan við sæluhúsið	32
Mynd 22. Gufuaugað Þ G-102 í suðurenda skálar í hliðum Ketilfjalls	32
Mynd 23. Gufuaugað Þ G-103 í flagi sunnan undir Tjarnarási	33
Mynd 24. Gufuaugað Þ G-109 á sunnanverðum Röndum	33
Mynd 25. Gufuaugað Þ G-110 í nýlegri leirskellu vestan undir Ketilfjalli.....	34
Mynd 26. Gasstyrkur í gufu og samsætuhlutföll í þéttivatni úr gufuaugum á Þeistareykjum.....	36
Mynd 27. Samsætuvið sýna árunna 2012–2019 úr gufuaugum á Þeistareykjum ásamt úrkomulínu <i>Craigs</i> (1961)	39
Mynd 28. Gufuaugu í Kröflu	42
Mynd 29. Gufuaugað K G-104 í austurhlíð Leirhnjúks	43
Mynd 30. Undirbúningur gufusýnatöku úr gufuauganu K G-106 í gili vestan við holu K-14.....	43
Mynd 31. Undirbúningur sýnatöku úr gufuauganu K G-107 í gígskál norðan Vitis	44
Mynd 32. Gasstyrkur í gufu og samsætuhlutföll í þéttivatni úr gufuaugum í Kröflu	46
Mynd 33. Samsætuvið sýna árunna 2012–2019 úr gufuaugum á Kröflusvæðinu ásamt úrkomulínu <i>Craigs</i> (1961)	48
Mynd 34. Gufuaugu í Námafjalli og Bjarnarflagi.....	51
Mynd 35. Gufuaugað N G-105 í austurbarmi gils upp af stöðvarhúsinu í Bjarnarflagi	52
Mynd 36. Undirbúningur sýnatöku úr gufuauga N G-106 í flagi vestan holu H-9 á Hverum52	
Mynd 37. Sýnataka úr gufuauga N G-110 á Námafjalli, í leirskellu ofan syðra gilsins	53
Mynd 38. Gasstyrkur í gufu og samsætuhlutföll í þéttivatni úr gufuaugum á Námafjallssvæði	56
Mynd 39. Samsætuvið sýna árunna 2012–2019 úr gufuaugum á Námafjallssvæðinu ásamt úrkomulínu <i>Craigs</i> (1961).	57
Mynd 40. Sýnatökustaðir í Mývatnssveit.....	64
Mynd 41. Styrkur köfnunarefnis og fosfats í sýnum úr Mývatnssveit	68
Mynd 42. Styrkur arsens í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt umhverfismörkum I, II, III og IV og mörkum fyrir neysluvatn	69
Mynd 43. Styrkur arsens í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk og LUD-4 ásamt umhverfis- mörkum I, II, III og IV og hámarksgildi fyrir neysluvatn.....	69
Mynd 44. Styrkur arsens í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I og II.....	70
Mynd 45. Styrkur arsens í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I	70
Mynd 46. Styrkur arsens í lindum við Mývatn ásamt umhverfismörkum I	71
Mynd 47. Styrkur áls í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt viðmiðunarmörkum fyrir neysluvatn.....	71
Mynd 48. Styrkur áls í vatni úr borholum ásamt viðmiðunarmörkum fyrir neysluvatn.....	72
Mynd 49. Styrkur áls í vatni úr borholum ásamt hámarksgildi fyrir neysluvatn	72
Mynd 50. Styrkur áls í vatni í lindum við Mývatn.....	73
Mynd 51. Styrkur kopars í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt umhverfismörkum I, II og III.....	74
Mynd 52. Styrkur síns í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt umhverfismörkum I og II.....	74
Mynd 53. Styrkur kadmíums í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflag- slóni ásamt umhverfismörkum I, II (0,0001 mg/L) og III	74

Mynd 54. Styrkur blýs í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflaglóni ásamt umhverfismörkum I, II og III.....	75
Mynd 55. Styrkur króms í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflaglóni ásamt umhverfismörkum I og II.....	75
Mynd 56. Styrkur nikkels í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflaglóni ásamt umhverfismörkum I.....	75
Mynd 57. Styrkur kopars í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I (0,0005 mg/L), II og III ..	76
Mynd 58. Styrkur síns í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I og II.....	76
Mynd 59. Styrkur kadmíums í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I, II og III ..	76
Mynd 60. Styrkur blýs í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I og II ..	77
Mynd 61. Styrkur króms í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I og II ..	77
Mynd 62. Styrkur nikkels í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I ..	77
Mynd 63. Styrkur kopars í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum I, II og III ..	78
Mynd 64. Styrkur síns í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum I og II ..	78
Mynd 65. Styrkur kadmíums í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum I, II og III.....	78
Mynd 66. Styrkur blýs í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum I og II.....	79
Mynd 67. Styrkur króms í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum I og II.....	79
Mynd 68. Styrkur nikkels í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum I.....	79
Mynd 69. Sýnatökustaðir í Kelduhverfi og á Þeistareykjum ..	82
Mynd 70. Styrkur arsens í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I.....	85
Mynd 71. Styrkur áls í vatni úr lindum í Kelduhverfi ..	85
Mynd 72. Styrkur kopars í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I og II ..	86
Mynd 73. Styrkur síns í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I og II ..	86
Mynd 74. Styrkur kadmíums í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I og II ..	86
Mynd 75. Styrkur blýs í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I og II ..	87
Mynd 76. Styrkur króms í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I og II ..	87
Mynd 77. Styrkur nikkels í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I.....	87
Mynd 78. Styrkur arsens í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I (0,0004 mg/L).....	88
Mynd 79. Styrkur áls í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ..	88
Mynd 80. Styrkur kopars í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I, II og III ..	89
Mynd 81. Styrkur síns í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I og II ..	89
Mynd 82. Styrkur kadmíums í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I og II.....	89
Mynd 83. Styrkur blýs í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I og II ..	90
Mynd 84. Styrkur króms í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I og II ..	90
Mynd 85. Styrkur nikkels í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I ..	90
Mynd 86. Styrkur arsens (As) á völdum stöðum í Mývatnssveit ..	91
Mynd 87. Styrkur króms (Cr) á völdum stöðum í Mývatnssveit ..	92

Mynd 88. Mælt hitastig við sýnatöku á völdum stöðum í Mývatnssveit	92
Mynd 89. Mæld rafleiðni í sýnum á völdum stöðum í Mývatnssveit	92
Mynd 90. Styrkur kísils (SiO_2) á völdum stöðum í Mývatnssveit	93
Mynd 91. Styrkur arsens (As) á völdum stöðum í Kelduhverfi og á Þeistareykjum	93
Mynd 92. Styrkur króms (Cr) á völdum stöðum í Kelduhverfi og á Þeistareykjum	93
Mynd 93. Mælt hitastig við sýnatöku á völdum stöðum í Kelduhverfi og á Þeistareykjum	94
Mynd 94. Mæld rafleiðni í sýnum á völdum stöðum í Kelduhverfi og á Þeistareykjum	94
Mynd 95. Styrkur kísils (SiO_2) á völdum stöðum í Kelduhverfi og á Þeistareykjum	94

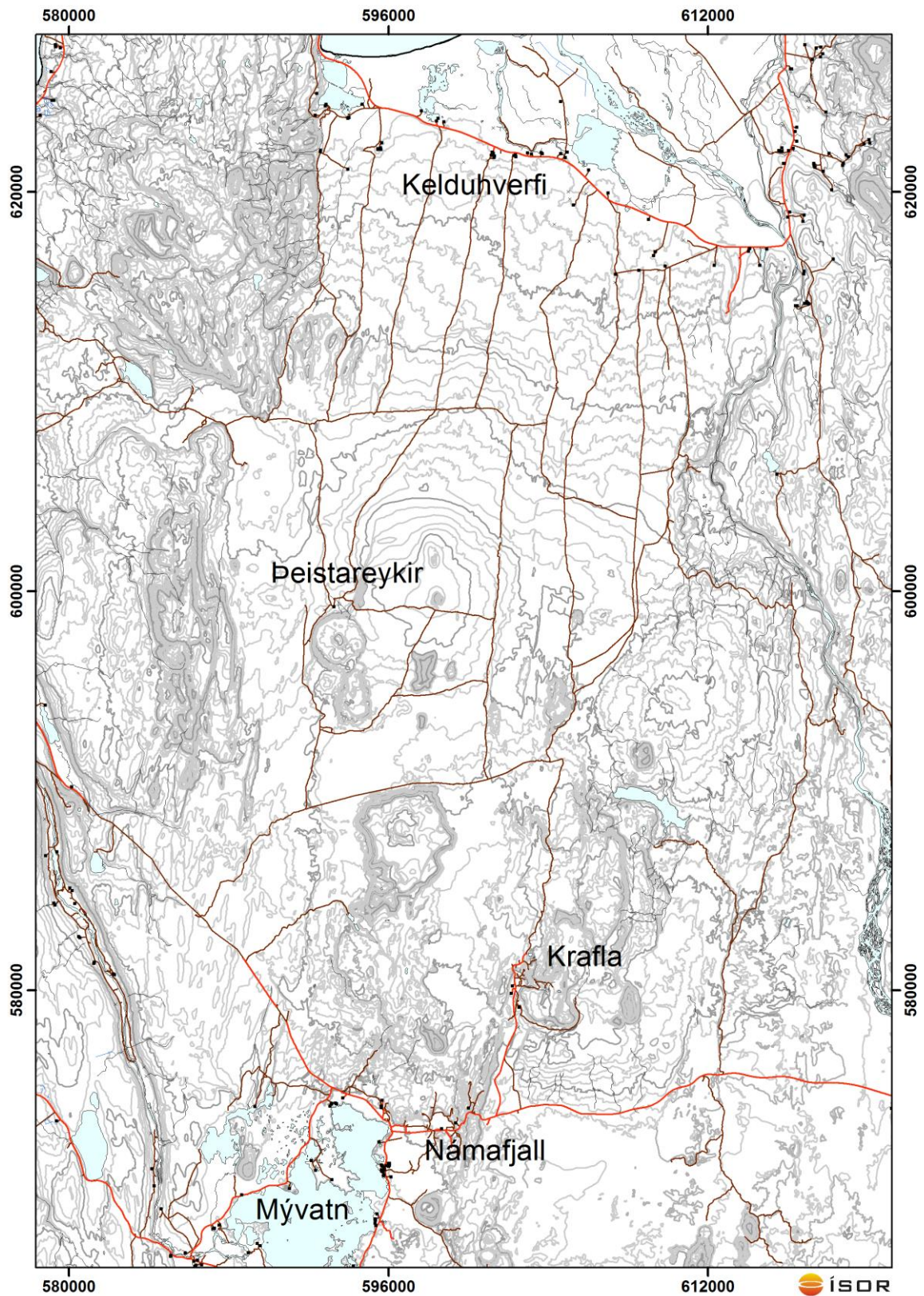
1 Inngangur

Í þessari skýrslu er greint frá athugunum á yfirborðsvirkni jarðhitans á Þeistareykjum og sýnatöku úr gufuaugum á þremur jarðhitasvæðum á Norðausturlandi, þ.e. Þeistareykjum, Kröflu og Námafjalli, og vöktun grunnvatns í Mývatnssveit og Kelduhverfi á árinu 2019 (mynd 1). Niðurstöður ársins eru bornar saman við eldri athuganir á svæðunum sem ná mislangt aftur í tímann eftir atvikum. Tilgangurinn er að kortleggja virknina og 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 jarðhitanýtingar. Niðurstöðurnar leggja síðan grunn að frekara eftirliti til framtíðar.

Athuganirnar hafa verið í föstum skorðum undanfarin ár. Hvert ár er lögð áhersla á eitt af svæðunum þremur en minna gert á hinum tveimur. Þannig var áherslan á Þeistareykji árið 2015, Námafjall árið 2016 og Kröflu árið 2017 (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2015, 2016, 2017). Sumarið 2018 voru aftur gerðar ítarlegar athuganir á jarðhitavirkni á Þeistareykjum en yfirferðin um Kröflu og Námafjall var lauslegri. Undanfarin ár hafa orðið fremur litlar breytingar á yfirborðsvirkni á svæðunum, sérstaklega Námafjalli og Kröflu, og var ákveðið að breyta tilhögun eftirlitsins aðeins. Árið 2019 var ekki lögð sérstök áhersla á eitt þessara þriggja svæða heldur umfang eftirlitsins minnkað og einskorðað við sýnatöku og grunnvatnseftirlit eins og áður. Yfirborðsvirkni var aðeins skoðuð á Þeistareykjum og aðallega nýleg virkni á svæðinu við Bæjarfjall og Ketilfjall. Í öllum tilfellum var leitast við bera virknina saman við eldri lýsingar (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2015, og heimildir sem þar er vísað í). Gufusýni voru tekin úr gufuaugum á jarðhitasvæðunum þremur og efnasamsetning gufu borin saman við eldri efnagreiningar frá sömu slóðum. Efnasamsetning gufu stjórnað m.a. af hitastigi í jarðhita-kerfinu og langtímabreytingar á gufunni gefa því vísbendingar um þróun hita í kerfunum. Þá komu fram miklar breytingar á gufusamsetningu í tengslum við eldsumbrotin í Kröflu sem enn eimur eftir af og er markmið eftirlitsins með efnasamsetningu gufu einnig að fylgjast með því hvernig þær breytingar ganga til baka.

Gerðar voru mælingar á efnasamsetningu grunnvatns í Mývatnssveit og affallsvatni frá virkjunum í Kröflu og Bjarnarflagi í þeim tilgangi að kanna áhrif frá affallsvatni á grunnvatnið. 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, úr tíu í níttján.

Þá er hér einnig greint frá niðurstöðum sams konar vöktunar á grunnvatni á Þeistareykjum og í Kelduhverfi en þær eru gerðar til að fylgjast með áhrifum Þeistareykjavirkjunar á grunnvatn. Vöktun á grunnvatni í Kelduhverfi hefur farið fram í núverandi mynd frá árinu 2007 en sýnatökustöðum á Þeistareykjum var bætt við árið 2013.



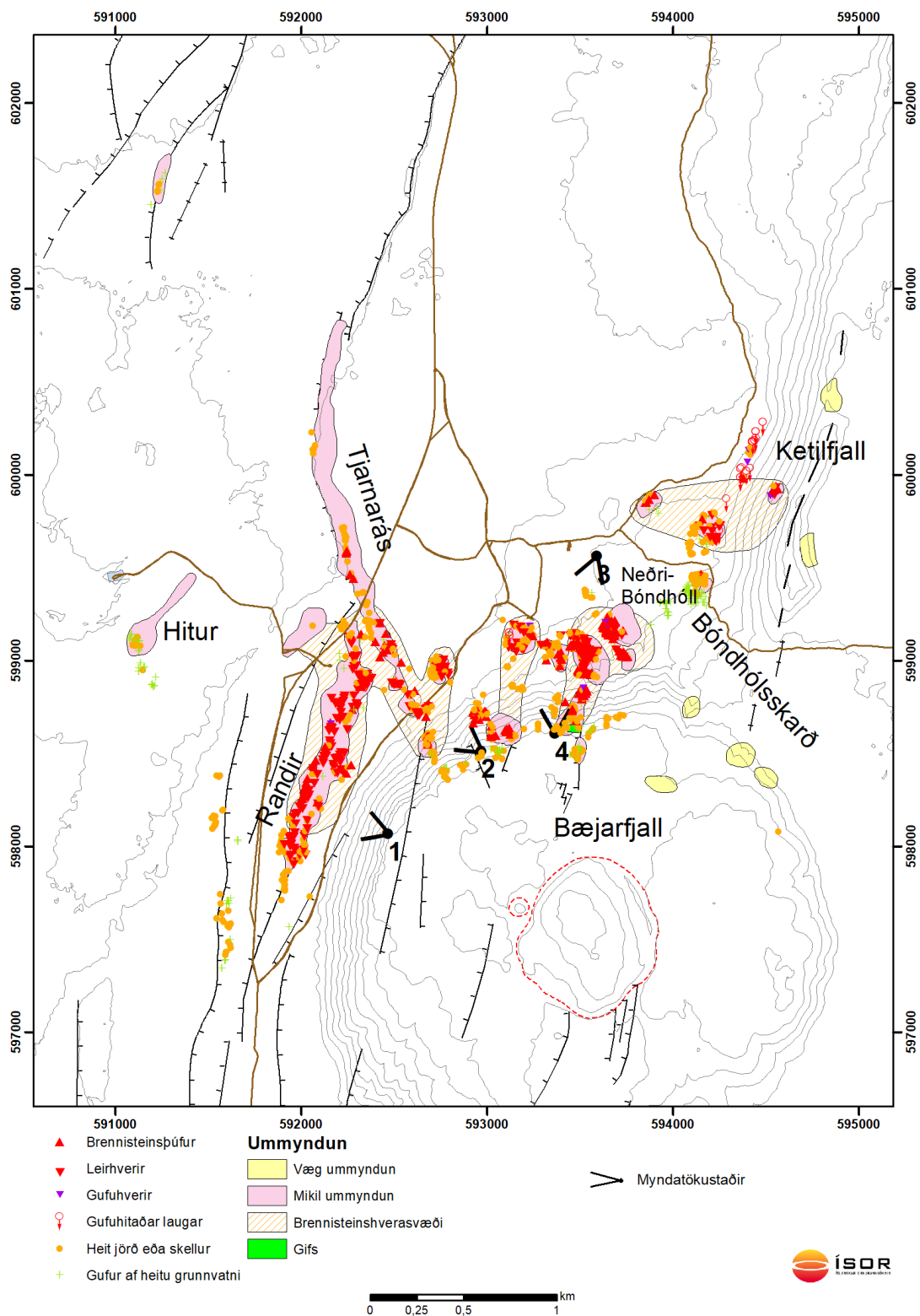
Mynd 1. Yfirlitskort af þeim svæðum sem fjallað er um í skýrslunni.

2 Þeistareykir

2.1 Yfirborðsvirkni á Þeistareykjum

Fyrir tæplega 40 árum var gerð úttekt á yfirborðsvirkni á Þeistareykjum og birtust niðurstöðurnar í skýrslu Orkustofnunar (Gestur Gíslason o.fl., 1984). Þá vann Kristján Sæmundsson jarðfræðiyfirlit árið 2007 þar sem jarðhitakort af svæðinu var uppfært frá 1984 (Kristján Sæmundsson, 2007) og er kort Kristjáns notað sem grunnur í þessari skýrslu. Árin 2012, 2015 og 2018 var gerð úttekt á yfirborðsvirkninni og teknar hitamyndir og ljósmyndir. Einnig voru tekin sýni úr gufuaugum og gerðar gasflæðimælingar (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2013b; 2015, 2018). Síðastliðin ár hefur þessu svo verið fylgt eftir með yfirferð um svæðið og borið saman við úttektina frá 2012 (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2013a; 2014, 2015, 2016, 2017, 2018).

Á Þeistareykjum var aðallega farið yfir svæðið norðan við Bæjarfjall, ofan á Bæjarfjalli sem og nýju virknina neðan við Ketilfjall. Annars var farið lauslega yfir önnur svæði þar sem jarðhitavirkni á yfirborði hefur áður verið getið, jarðhitanum lýst og hann flokkaður (Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson, 2005). Jarðhitasvæðinu á Þeistareykjum er skipt upp í eftirfarandi undirsvæði: Hitur, Randir, Tjarnarás, Bæjarfjall og Ketilfjall (mynd 2). Megináhersla var lögð á þau svæði þar sem ný og aukin jarðhitavirkni hefur komið fram eftir að vinnsla hófst á Þeistareykjum.



Mynd 2. Jarðhitakort af Þeistareykjum. Ummyndun frá 2007 með kortlagningu frá 2019 og 2018 (tákn). Nokkrar breytingar hafa orðið á yfirborðsjarðhitanum frá fyrri athugun, sér í lagi umhverfis borholurnar vestan við Bóndhólsskarð og undir Ketilfjalli.

2.1.1 Misgengi suðvestan Randa og jarðhitinn við Hitur

Gufueimur kemur upp úr misgengi með N-S stefnu sem liggur vestan og samsíða veginum sem liggur að holum ÞG-8 og ÞG-2. Syðstu jarðhitaummerki eru nærri gatnamótunum þar sem vegur af Hólasandi skiptist annars vegar til Bæjarfjalls og hins vegar að holum ÞG-2 og ÞG-8 (mynd 2). Gufustreymið var áþekkt því sem hefur verið undanfarin ár. Til norðurs má fylgja misgenginu og hitanum eftir. Eftir því sem norðar dregur lækkar misgengisstallurinn en ummyndun eykst og hitinn hækkar. Þessi virkni fjarar út á móts við virknina í Röndum sem er undir norðvestanverðu Bæjarfjalli. Á kafla er nokkur leirummyndun með yfir 95°C. Á þeim stað er háspennumastur og gufar þó nokkuð nærri stólpum þess (mynd 3). Brennisteinsútfellingar fylgja gufunni.

Norðvestar, eða sunnan við borholu ÞG-8, eru hitasvæði í hrauninu, kennd við Hitur, þar sem heit, lyktarlaus gufa streymir upp til yfirborðs. Ekki var gengið að þessu svæði núna í ár en gufuvirkni mátti sjá úr fjarlægð.

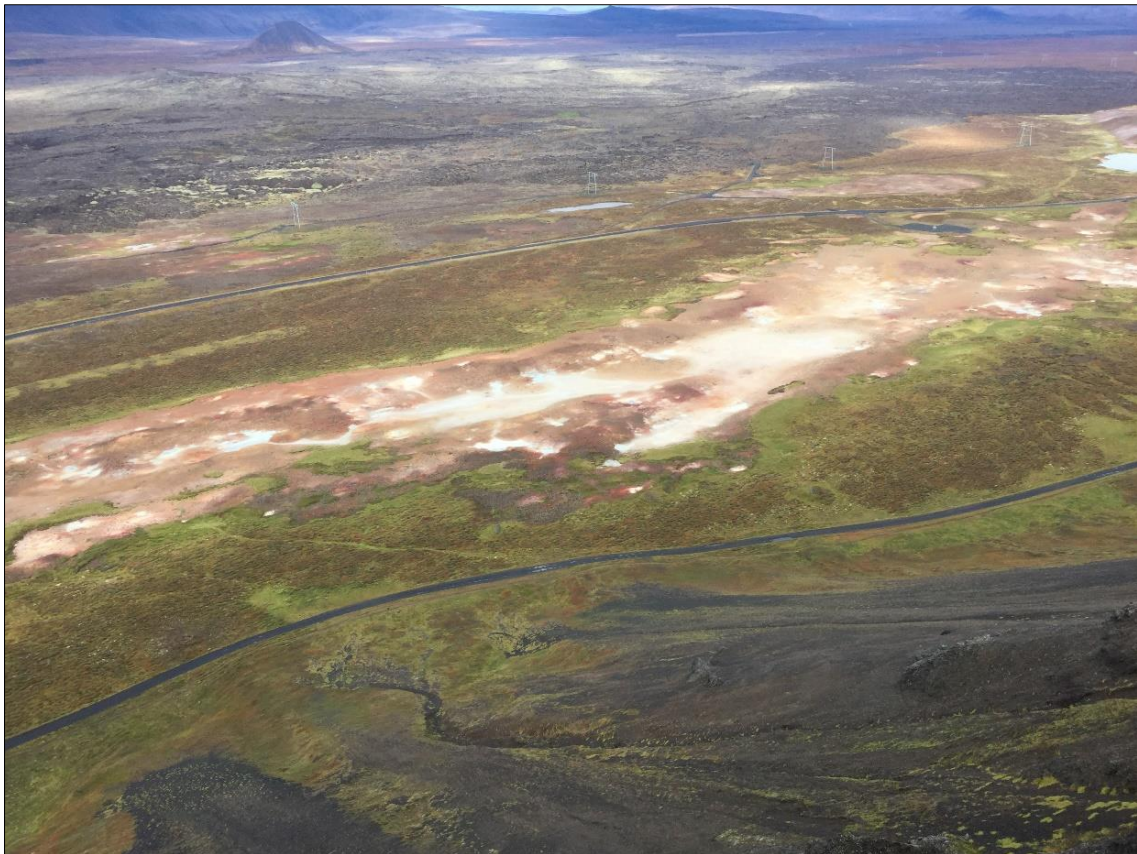


Mynd 3. Gufustreymi við Hitur. Hiti mældist 95°C, sem er svipað og var árið 2018.

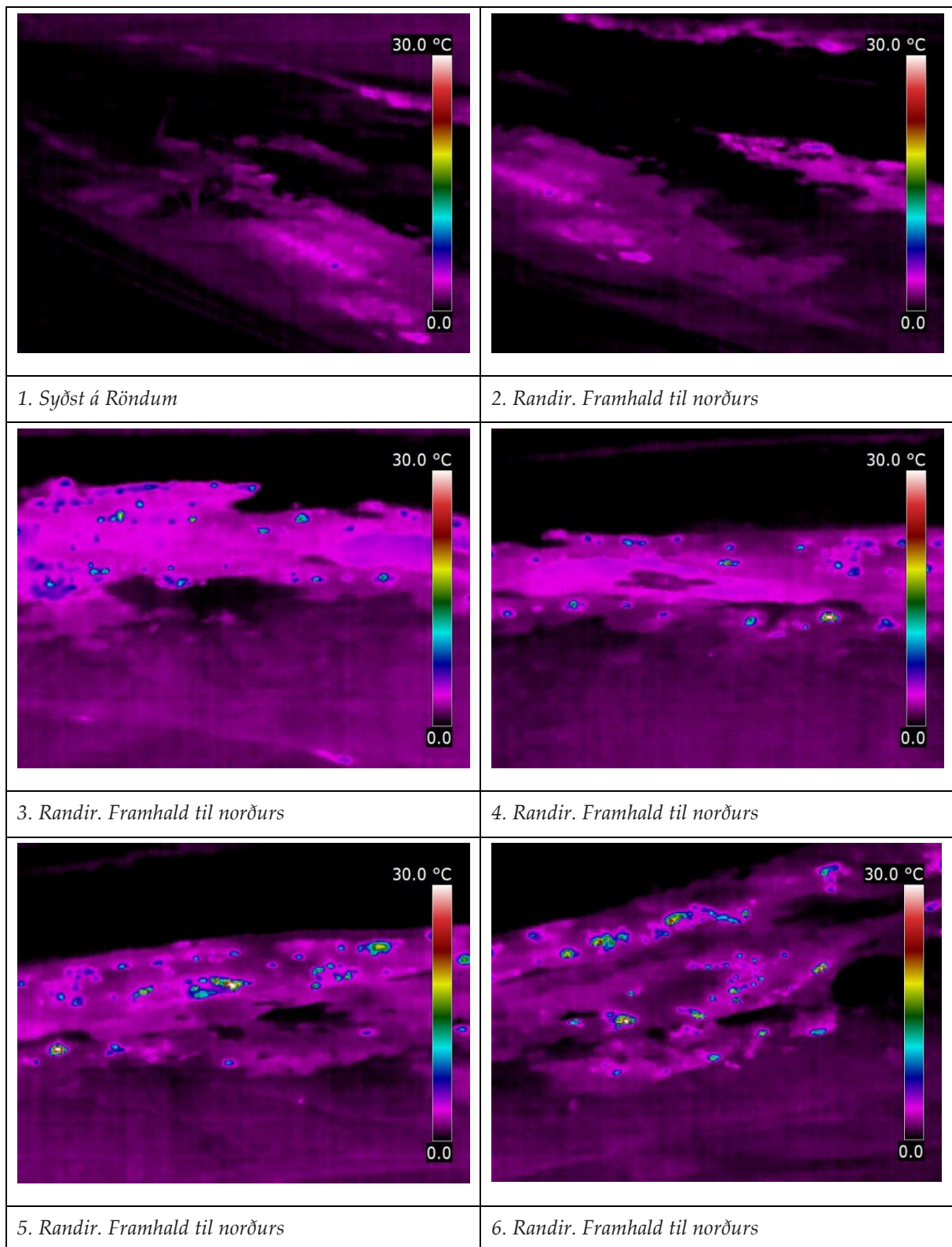
2.1.2 Randir

Jarðhitavirknin á Röndum virðist tengjast misgengi með NNA-lægri stefnu og falli til vesturs. Jarðhitinn og gufueimurinn sem kemur upp suðvestan og vestan við Randir, og lýst er í kafla 2.1.1, er á misgengi með falli til austurs og myndast smá sigdæld þarna á milli misgengjanna sem þrengist til suðurs (mynd 2). Á Röndum eru fjölmargir leir- og brennisteinshverir og ummyndun mikil. Ummyndunin einkennist aðallega af rauðum og gráum leir. Virknin kemur upp á tveimur nánast samsíða línunum með 30–70 m bili. Inni á milli er köld leirumyndun en á línunum er nánast samfelld virkni sem þó myndar hveraþyrpingar með meiri virkni (myndir 4 og 5). Hitinn í virkum leir- og brennisteinshverum er yfir 95°C í flestum tilfellum. Gufuaugu voru ekki aflmikil 2019 frekar en undanfarin þrjú sumur. Frá gufunni er brennisteinslykt en í leirhverunum bullar mismikið.

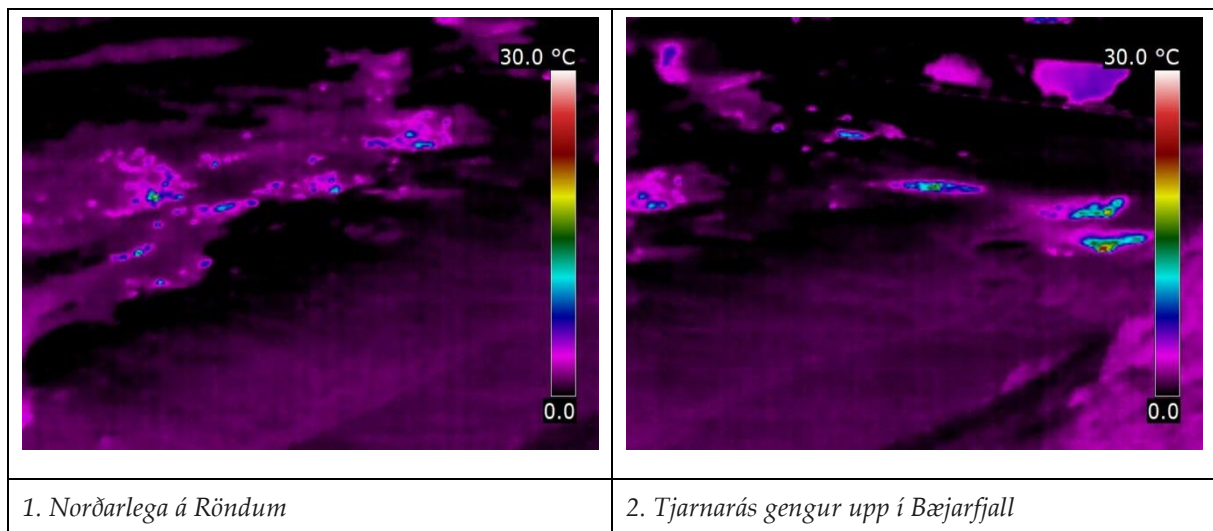
Hitamyndir af jarðhitanum á Röndum eru sýndar á myndum 5 og 6. Þær eru teknar ofan af Bæjarfjalli (mynd 2, myndatökustaður 1). Jarðhitastaðirnir og volg jörð koma vel fram á myndunum. Brennisteinsþúfur, gufu- og leirhverir skera sig vel úr sem litlir punktar í volgri jörð. Litlar breytingar er að sjá á milli ára.



Mynd 4. *Randir. Myndin er tekin ofan af Bæjarfjalli. Meginvirknin eru bullandi leirhverir.*



Mynd 5. Hitamyndir teknar ofan af Bæjarfjalli vestanverðu (myndatökustaður 1 á mynd 2). Jarðhita-
staðirnir og volg jörð koma vel fram á myndunum. Breytingar eru litlar sem engar frá fyrra ári.



Mynd 6. Framhald hitamynda (á mynd 5). Jarðhitinn á Röndum er tengdur tveimur misgengjum með NNA-læga stefnu (hitamynd 1). Syðri hluti Tjarnaráss sker virknina á Röndum með NNV-stefnu (hitamynd 2).

2.1.3 Tjarnarás

Jarðhitinn í Tjarnarási kemur í beinu framhaldi norður af Röndum en þó með annarri stefnu syðst. Tjarnarás liggur í sveigðu misgengi þar sem suðurendinn stefnir frá Bæjarfjalli til NNV en sveigir síðan til norðurs og loks til norðnorðausturs. Fall misgengisins er til vesturs. Jarðhitinn á þessu misgengi er mestur næst Bæjarfjalli og nær þar upp í miðjar hlíðar fjallsins. Ummyndun á Tjarnarási er mikil og teygir sig um 2 km norður fyrir Bæjarfjall. Ummyndunin einkennist af ljósum og rauðum leir meðfram misgengisbrúninni. Ljósmynd (mynd 7) af Tjarnarási er tekin ofan af Bæjarfjalli. Mynd 8 sýnir hveraskellu á Tjarnarási og hvernig virknin teygir sig upp í hlíðar Bæjarfjalls en hitamyndir af Tjarnarási eru sýndar á mynd 9.

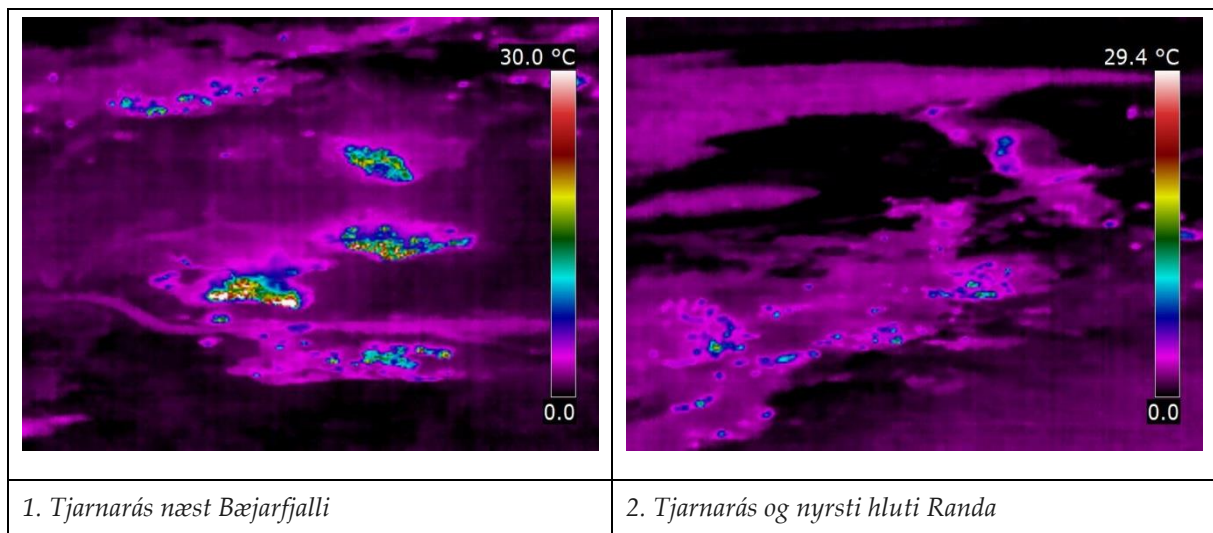


Mynd 7. Virknin á Tjarnarási teygir sig að Bæjarfjalli í suðri en þar er meginvirknin.

Einungis var suðurhluti Tjarnaráss skoðaður samhliða gufusýnatökunni og er jarðhitinn svipaður á þessu svæði eins og verið hefur undanfarin ár. Jarðhitavirkni syðst við Bæjarfjall og upp í hlíðar þess hefur heldur verið að aukast frá árinu 2017 eins og kom fram í fyrra og heldur áfram.



Mynd 8. Skellan við sýnatökustað PG-103. Virkni Tjarnaráss teygir sig upp í miðjar hliðar Bæjarfjalls.



Mynd 9. Hitamyndir. Myndatökustaður 2 á mynd 2. Myndirnar sýna hvar misgengið á Röndum gengur inn í Tjarnarásmisgengið. Virkni á Tjarnarási er mest næst Bæjarfjalli.

2.1.4 Bæjarfjall

Jarðhitnum í og við Bæjarfjall má skipta upp í nokkur afmörkuð svæði en mestallur jarðhitinn liggur þó á milli tveggja misgengja með N-S læga stefnu sem mynda sigdal í toppi fjallsins (mynd 2). Misgengin eru þó fleiri innan sigdældarinnar. Jarðhitinn kemur aðallega fram á tveimur línunum sem liggja eins og misgengin en þó má sjá NA-læga og VNV-læga legu jarðhitans á þessu svæði. Það passar ágætlega við jarðhníksgreiningu Maryam Khodayar o.fl. (2015).

Á vestari línunni er meginvirknin á tveimur stöðum. Annar er í norðurhlíðum fjallsins ofarlega en teygir sig niður í gil. Þarna eru gufu- og leirhverir sem og brennisteinshverir sem eru hlutfallslega fleiri í hlíðinni. Neðarlega í þessu gili skreidd hlíðin fram vorið 2018 og virðist sem brotsárið liggi meðfram jarðhitavirkninni. Virkni hvera er svo meiri neðar þegar komið er niður á sléttuna. Hinn staðurinn er í gilskorningnum hjá skálanum og þar um kring (mynd 10). Þar eru aðallega hvíssandi gufuaugu og bullandi leirhverir, brennisteinslykt er af gufu. Á milli þessara svæða er töluverður hiti í jörðu í stöku skellum ($<95^{\circ}\text{C}$). Virknin núna í september 2019 var mjög svipuð því sem var á árunum frá 2012 til 2018.



Mynd 10. Jarðhitavirknin neðan við sæluhúsið. Þarna er þó nokkurt gufustreymi og heitar leirskellur, og eru leirhverir ráðandi á þessu svæði. Sýnatökustaður Þ G-101.

Jarðhitinn á eystri línunni er mun umfangsmeiri og breiðir hann töluvert úr sér þegar niður á sléttuna er komið (500x300 m) og myndar þar nánast samfellt svæði með heitri jörð og skellum (myndir 11 og 12). Miðað við undanfarin ár er svæðið svipað, virkni er mikil í leir-, brennisteins- og gufuhverum.



Mynd 11. Jarðhitinn á sléttunni neðan við Bæjarfjall norðanvert. Fyrir miðju er mesta jarðhitavirknin niður hlíðina og út á sléttuna.



Mynd 12. Framhald til austurs af mynd 13. Neðri-Bóndhóll er á miðri mynd.

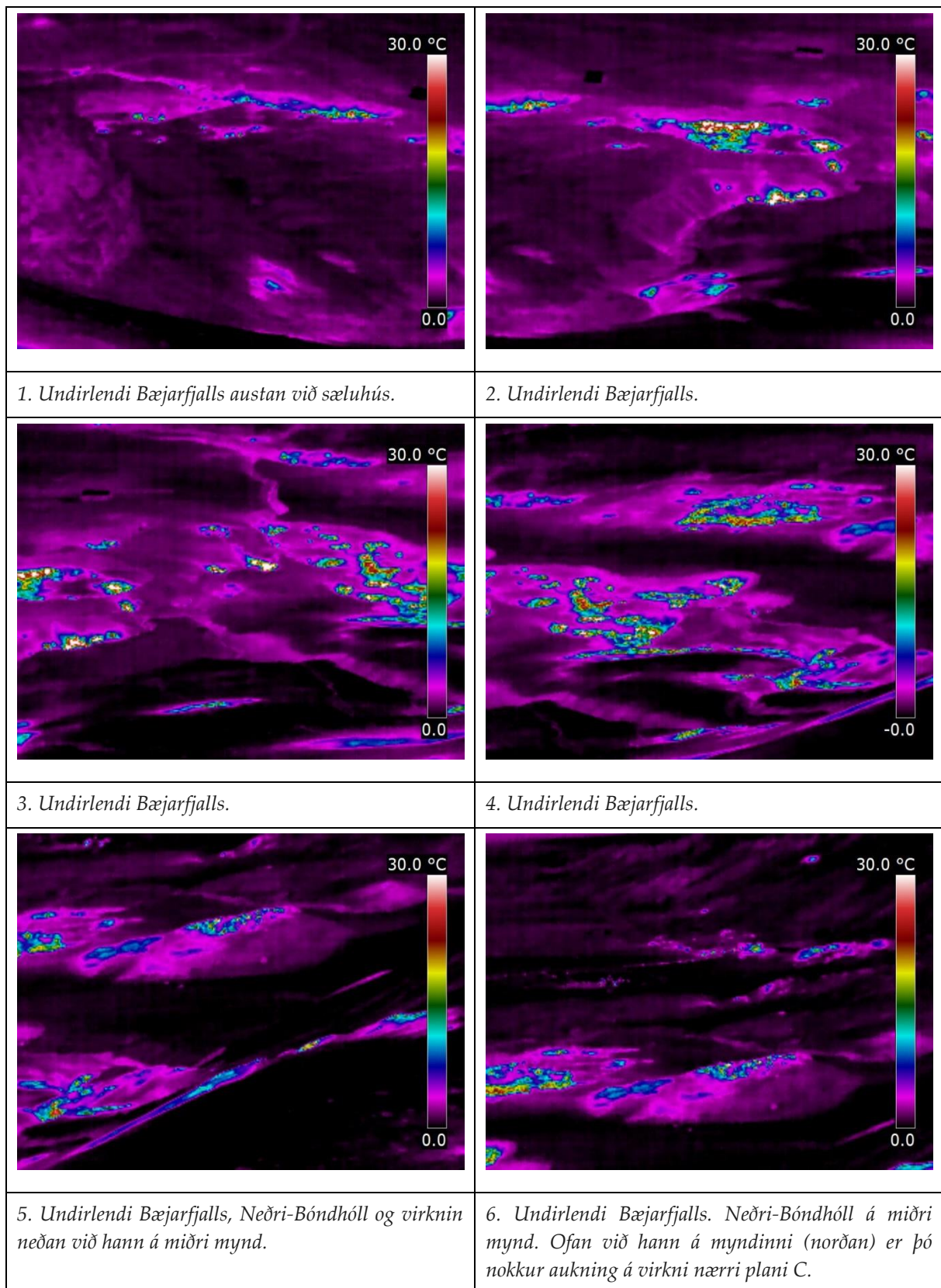
Á milli vestari og eystri jarðhitalínanna í Bæjarfjalli er svæði (100x60 m) niðri á sléttunni sem tengir þessi svæði saman í nánast einn samfelldan gufu- og leirhveraflekk með A-V læga stefnu (myndir 2 og 11). Virknin á þessu svæði hefur ekki verið mikil, aðallega leirhverir og heitar skellur. Virknin í hverunum virtist vera heldur meiri á þessu svæði 2018 og 2019 en hún hefur verið síðan 2012. Sumir leirhverirnir sletta töluvert og eins bullar mikið í þunnfljótandi hverunum.

Hin mikla virkni norðan við Bæjarfjall (þ.e. í hliðarfætinum) og suðurenda Tjarnaráss gæti bent til þess að jarðhitavirknin þarna tengist hliðrun (sniðgengi) með VNV-ASA stefnu (Maryam Khodayar o.fl., 2015). Þessi hliðrun tengist aðalsiginu á sprungusveiminum sem myndar belti með stefnu frá Þeistareykjum yfir Stórahver og að ummyndarskellum við Mælifell (Kristján Sæmundsson, 2007). Einnig má sjá VNV-, NV- og NA-lægar stefnur þegar dreifing jarðhitans er skoðuð í norðanverðu Bæjarfjalli og á sléttunni norðan fjalls. Þetta er í góðu samræmi við kortlagningu Maryam Khodayar o.fl. (2015) sem bendir meðal annars til að VNV- og NA-læg sniðgengisbrot þveri svæðið í norðurenda fjallsins.

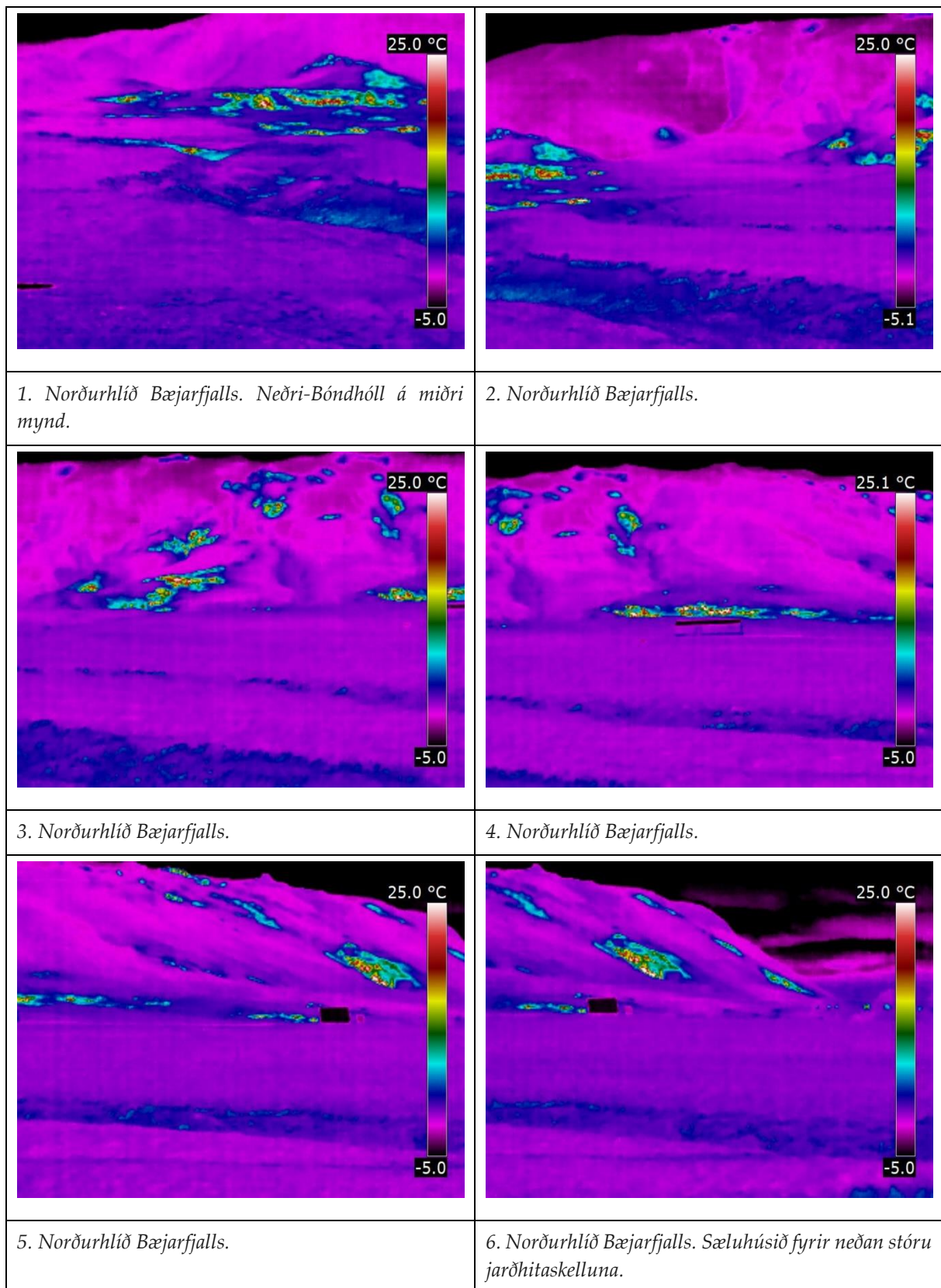
Í ár var svo farið í nánari athugun ofan á norðanverðu Bæjarfjalli, jarðhitinn var skoðaður eins hefur verið gert en einnig mælt gasflæði (CO_2) um jarðveg, meðfram brún fjallsins og á stökum punktum þar sem jarðhiti er og á líklegum misgengjum (brotum). Engar verulegar breytingar eru á jarðhitavirkninni á fjallinu sjálfu þótt líklega hafi hún aukist í vesturhluta þess. Koldíoxíðflæði var aðeins á þeim stöðum sem jarðhiti var á yfirborði og gildi svipuð því sem áður hefur verið mælt (sjá mynd í viðauka 2).

Á milli Bæjarfjalls og Ketilfjalls er jarðhiti neðst í brekkunni neðan við Bóndhólsskarð. Þarna kemur upp nokkur gufa úr hrauni og í jarðvegi er hitinn á gufunni allt að 70°C. Svæðið er að mestu gróið (gras og mosi). Stærð þess er um 50x30 m. Svæðið kemur fram á mynd 13 (hitamynd 6, ljósari blettur hægra megin og ofan við Neðri-Bóndhól). Nær borteig C (sunnan við), við borholur ÞG-3, ÞG-6, ÞG-7, ÞG-12 og ÞG-16, hefur virkni aukist mjög frá 2017 en þá bar fyrst á þó nokkurri aukningu á þessum stað. Aukningin var mikil í fyrra og sést vel á hitamyndinni (mynd 13, 6) en fjallað verður um aukninguna í kaflanum um Ketilfjall.

Hitamyndir teknar ofan af Bæjarfjalli (myndatökustaður 4) og frá borholu ÞG-9 (myndatökustaður 3, sjá mynd 2) sýna dreifingu jarðhitans vel. Á mynd 13 sést undirlendi Bæjarfjalls og hvernig jarðhitastaðirnir raða sér upp. Sama er á mynd 14 en þar má sjá dreifingu jarðhitans í norðurhlíð Bæjarfjalls sem og hluta af jarðhitavirkninni á sléttunni neðan við fjallið. Almennt eru litlar breytingar á dreifingu jarðhitans á svæðinu fyrir utan aukna virkni milli Bæjarfjalls og Ketilfjalls. Með samanburði á hitamyndum milli 2017, 2018 og 2019 á norðurhlíð fjallsins má greina svipaða virkni.



Mynd 13. Jarðhitinn við norðanvert Bæjarfjall. Hitamyndirnar eru teknar ofan af fjallinu á myndatökustað 4 (sjá mynd 2).



Mynd 14. Hitamyndir af norðurhlíð Bæjarfjalls. Myndatökustaður 3 á mynd 2. Á myndum 1 og 2 er Neðri-Bóndhóll og heita skellan fyrir neðan hann. Á myndum 3 og 4 er virki jarðhitinn austan til og glittir í jarðhitann á sléttunni sem er nánast samfelld. Á myndum 5 og 6 kemur vestasti jarðhitinn fram og virknin frá Tjarnarási sem teygir sig upp í Bæjarfjall.

2.1.5 Ketilfjall

Við rætur Ketilfjalls eru volgar laugar sem eru afrennsli upphitaðs grunnvatns frá hitagjafa undir fjallinu (mynd 2). Laugarnar koma fram á um 500 m langri línu með NNA-læga stefnu. Hitinn í laugunum hefur verið frá 14 til 34°C síðustu árin, lítið eitt lægri en 2014 þegar hitinn fór mest í 37°C. Í skýrslu Gests Gíslasonar o.fl. (1984) er hitinn í laugunum sagður frá 11,8 til 41,7°C og Kristján Sæmundsson (2007) nefnir laugarnar með hita frá 30 til 40°C. Laugarnar voru ekki hitamældar núna í ár (2019).

Uppi í miðjum vesturhlíðum Ketilfjalls er mest áberandi jarðhitastaðurinn. Þar eru bæði gufu- og leirhverir og brennisteinsþúfur um 30x10 m stóru svæði sem myndar nokkurs konar skál í hlíð fjallsins. Nokkurt gufustreymi er á þessum stað, bæði frá gufuaugum og brennisteinsþúfum, og er hiti >95°C (mynd 15). Neðan við þessa virkni (skálina) eru tveir nýir staðir báðum megin við lítið framhlaup (gamalt). Sunnan þess er komið gufuauga (mynd 17) og náðist að taka sýni úr því (G-110), norðan við framhlaupið er gufusvæði með sölnuðum gróðri og leirbolla sem rann úr (mynd 18). Hiti á þessum nýju stöðum var yfir 95°C.



Mynd 15. Jarðhitaskálinn í miðjum hlíðum Ketilfjalls. Dreifing jarðhitavirkni þar er svipuð og síðustu ár. Kröftugasta gufustreymið er norðarlega í skálinni neðan við gula brennisteinsskellu (sýnatökustaður þ G-102). Gufustreymið hefur verið heldur vaxandi síðustu árin.

Jarðhiti er norðan og sunnan við borteig holna ÞG-3, ÞG-6 og ÞG-7. Nyrðra svæðið er stærra með brennisteinsþúfum og gufu- og leirhverum með þó nokkru vatni. Virkni er töluverð í gufu- og leirhverunum, bullar mikið og hvín í gufuopum. Virkni á þessu svæði hefur verið vaxandi undanfarin ár og hafa bæst við nýjar, heitar skellur og niðurföll frá kortlagningunni 2015–2018 (myndir 16 og 18).

Vestar á sléttunni, við jaðar ummyndaða svæðisins, er svæði með stökum jarðhitaskellum (hrúgöldum; hiti > 90°C) þar sem brennisteinsþúfur eru eingöngu en lítill sem enginn hiti á milli þeirra. Er þetta í samræmi við kort Kristjáns Sæmundssonar (2007).



Mynd 16. Jarðhitinn norðan við holur ÞG-3, ÞG-6 og ÞG-7. Þó nokkur virkni er á svæðinu, síst minni en í fyrra, með gufuaugum, leirhverum og stöku brennisteinsummyndun kringum gufuopin. Ný virkni hefur verið að koma fram síðastliðin ár (þ.e. frá 2015, aukning frá 2017).



Mynd 17. Nýtt gufuauga og sölnaður gróður neðan við skálina í Ketilfjalli.



Mynd 18. Sölnaður gróður, ný niðurföll, bullandi leirhverir, heit jörð og gufur eru enn að koma í ljós norðan við skelluna í Ketilfjalli.

Sunnan borteigs holna ÞG-3, ÞG-6 og ÞG-7 er jarðhiti nokkuð áberandi en þarna er heit jörð með gufuaugum (lítil virkni) og leirummyndun. Hiti í miðju flekksins er 95–97°C en þessum háa hita fylgja útfellingar (hverasölt). Í jöðrunum hefur gufustreymi aukist mjög og nær nú töluvert upp í hlíðina meðfram vegslóðanum og upp skarðið. Hiti er 70–90°C. Það vottar fyrir brennisteinslykt af gufunni. Virknin í þessum flekk jókst mikið milli áranna 2017 og 2018 og heldur áfram. Víða má sjá sölnaðan gróður og finna væga brennisteinslykt (mynd 19).



Mynd 19. Svæðið sunnan við holur ÞG-3, ÞG-6 og ÞG-7. Aukið gufustreymi sem er mest sunnan við ummyndaða flekkinn. Hiti er 70–97°C. Það vottar fyrir brennisteinslykt af gufunni. Hiti í miðju flekks er 95–97°C en þessum háa hita fylgja útfellingar (hverasölt). Virkni er svipuð og 2018.

2.1.6 Niðurstöður

Dreifing jarðhitans sem kortlagður var á Þeistareykjum sumarið 2012, 2015 og 2018 (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2013b; 2015, 2018) var áþekkt því sem áður hefur verið lýst (Gestur Gíslason o.fl., 1984; Kristján Sæmundsson, 2007). Þetta á að hluta til við um athuganir sumarsins 2019 en ekki var farið kerfisbundið yfir öll undirsvæðin. Þeir staðir þar sem mesta breytingin í jarðhita hefur orðið frá 2012 og 2015 eru norðan og sunnan við holur ÞG-3, ÞG-6 og ÞG-7, vestur af Ketilfjalli. Virkni á þessum svæðum hefur aukist til muna og enn eru að myndast nýir staðir norðan og norðvestan við holurnar. Sunnan við ummyndunarblettinn suður af borteignum hefur virknin aukist til muna frá 2017 og bætist enn við þá virkni. Einnig hefur virkni aukist í norðvesturhlíðinni (niður við rætur Ketilfjalls og í hlíðinni) og er mun meiri gufuvirkni og aukin virkni í gömlum skellum sem voru lítt áberandi áður. Nýr gufuhver og heit skella eru beggja vegna framhlaups sem er neðan við skelluna í hlíðinni í Ketilfjalli og nokkur virkni á þeim stöðum.

2.2 Efnasamsetning gufu úr gufuaugum á Þeistareykjum

2.2.1 Sýnatökustaðir á Þeistareykjum

Fimm sýnum af gufu og þéttivatni var safnað úr gufuaugum á Þeistareykjum miðvikudaginn 11. september 2019 í ágætu, stilltu en frekar þungbúnu veðri, með súldarvotti allra fyrst um morguninn. Sýnatöku- og efnagreiningaraðferðum er lýst í viðauka 1.

Til stóð að safna sýnum úr fjórum gufuaugum; G-101 við sæluhúsið, G-103 í sunnanverðum Tjarnarási, G-109 á sunnanverðum Röndum og G-102 í Ketilfjalli. Þegar komið var að Ketilfjalli kom í ljós að verulega hafði hitnað í ummyndunarskellum þar eins og áður var lýst í fyrri köflum, svo mjög að í einni þeirra hafði kviknað gufuauga sem virtist hæft til sýnatöku. Því var ákveðið að safna sýni úr þessu nýja auga en það fékk nafnið G-110.

Yfirlit um sýnatökustaði er sýnt í töflu 1 og staðsetning þeirra er sýnd á mynd 20 ásamt öðrum gufuaugum sem sýni hafa verið tekin úr á Þeistareykjum (Gestur Gíslason o.fl., 1984; Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2013b; 2013b; 2014; 2015; 2016; 2017; 2018). Í gagnagrunni ÍSOR eru sýnatökustaðirnir kallaðir „P G-101“ og svo framvegis en í texta og á myndum hér á eftir eru nöfn gufuaugna víða stytt í „G-101“ til einföldunar.

Tafla 1. Sýnatökustaðir á Þeistareykjum sumarið 2019.

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
G-110	H 93593	-	594382	599984	380	Vestan undir Ketilfjalli

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

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

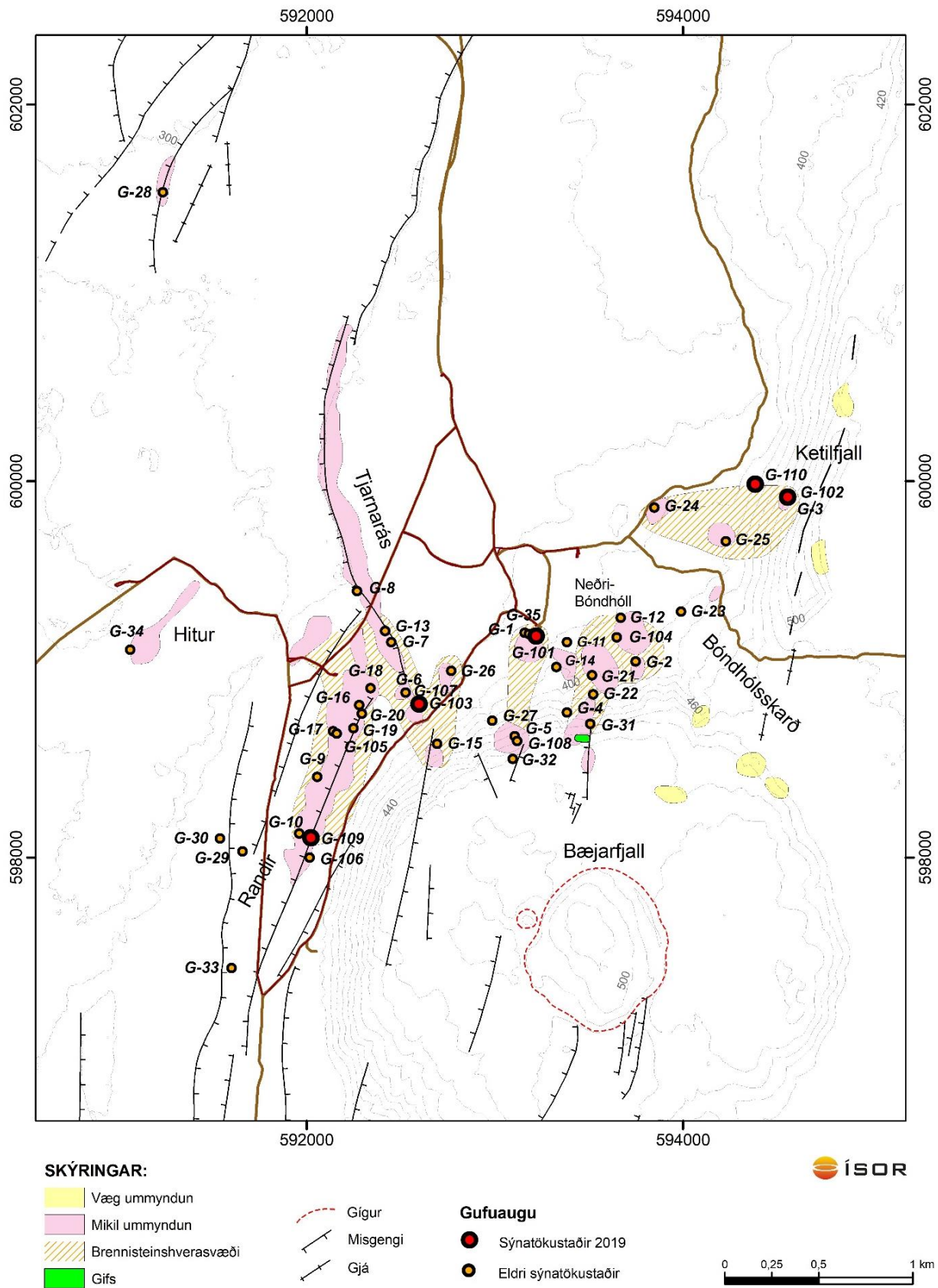
P G-101: Sæmilega öflugt en ekki mjög afmarkað gufuauga við hveralæk sunnan við sæluhús. G-101 er staðsett aðeins austar en G-1, í leirhólum í lækjarfarveginum (myndir 20 og 21).

P G-102: Mjög öflugt auga í skál í Ketilfjalli á slóðum gamla G-3. Undanfarin ár hefur sýnum yfirleitt verið safnað úr auga í skálinni norðanverðri en árin 2018 og 2019 var það í blautara lagi. Því var sýni safnað úr auga sunnan í skálinni þar sem G-3 var (myndir 20 og 22).

P G-103: Frekar kraftlítið en skýrt afmarkað auga sunnan til í leirflagi syðst í Tjarnarási og rétt norðan vegarins undir Bæjarfjalli. Augað G-107 sem safnað hefur verið úr undanfarin ár er í sama flagi, svo og G-6 til forna (myndir 20 og 23).

P 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 20 og 24).

P G-110: Fremur veiklulegt og nýlega kviknað gufuauga í leirskellu vestan undir Ketilfjalli, hér um bil beint neðan skálarinnar. Dauður og deyjandi gróður í kring. Ekki eru til eldri sýni af þessum stað en G-24 og G-25 eru ekki fjarri (myndir 20 og 25).



Mynd 20. Gufuaugu á Peistareykjum. Gufuaugu sem safnað var úr sumarið 2019 eru sýnd með rauðum táknum.



Mynd 21. Gufuaugað Þ G-101 í gili sunnan við sæluhúsið.



Mynd 22. Undirbúningur sýnatöku úr gufuauganu Þ G-102 í suðurenda skálar í hliðum Ketilfjalls.



Mynd 23. Gufuaugað Þ G-103 í flagi sunnan undir Tjarnarási.



Mynd 24. Undirbúningur sýnatöku úr gufuauganu Þ G-109 á sunnanverðum Röndum.



Mynd 25. Gufuaugað Þ G-110 í nýlegri leirskellu vestan undir Ketilfjalli.

2.2.2 Niðurstöður gufuefnagreininga

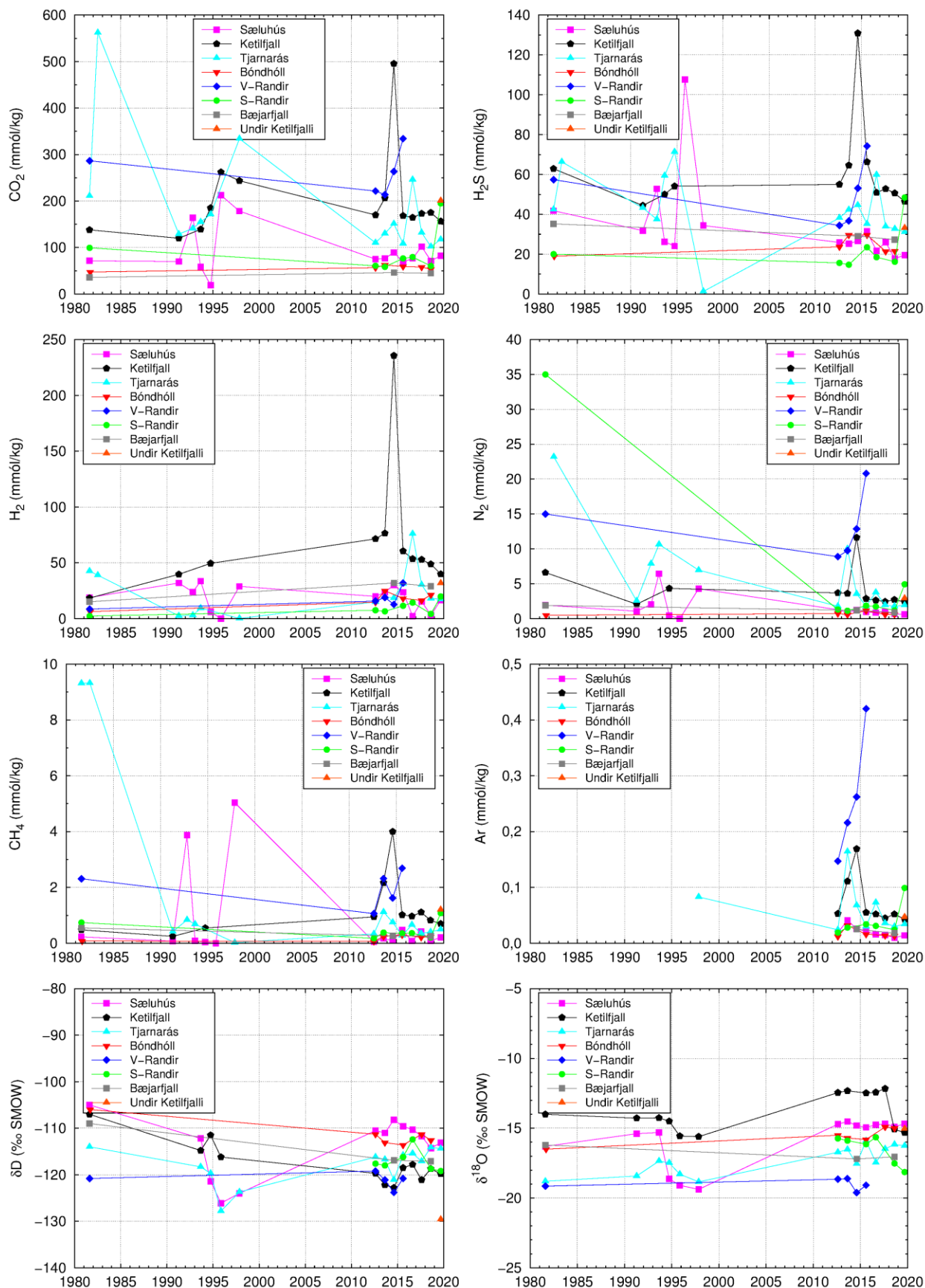
Niðurstöður efnagreininga sýna sem tekin voru á Þeistareykjum sumarið 2019 eru skráðar í töflu 2 og á mynd 26 er sýndur styrkur gastegunda og hlutföll stöðugra samsætna vetnis og súrefnis í gufu frá Þeistareykjum með tíma. Samsætuvík í sýnunum er teiknað á mynd 27 ásamt úrkomulínu Craigs (1961) og suðuferlum fyrir grunnvatn og djúpvökva borholna.

Efnagreiningar sýna sem safnað var fyrir 2012 á mynd 26 eru fengnar úr gagnagrunni ÍSOR. Nokkuð misjafnt er hversu margar efnagreiningar eru til úr hverju gufuauga. Einnig er allur gangur á því hversu ítarlegar efnagreiningarnar eru, til dæmis eru tvívetnisgreiningar fremur fáar og greiningar á argoni heyra til undantekninga í eldri sýnum.

Í töflu 3 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 Þeistareyki er notuð sú kvörðun CO_2 -hitamælisins sem gerir ekki ráð fyrir miklu CO_2 -flæði frá kviku.

Tafla 2. Efnasamsetning gufusýna frá Þeistareykjum sumarið 2019.

Sýni	20190181	20190184	20190182	20190183	20190185
Dagsetning	11.9.2019	11.9.2019	11.9.2019	11.9.2019	11.9.2019
Staður	Þ G-101	Þ G-102	Þ G-103	Þ G-109	Þ G-110
Hitastig (°C)	98,2	97,9	98,6	98,2	97,7
Gasstyrkur í gufu (mmól/kg)					
CO ₂	82,5	157	117	195	201
H ₂ S	19,5	46,4	31,1	48,4	33,2
H ₂	16,6	39,9	17,4	19,8	31,7
CH ₄	0,213	0,697	0,491	1,08	1,20
N ₂	0,63	2,39	1,93	4,92	2,91
O ₂	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Ar	0,014	0,043	0,034	0,099	0,047
Steinefni í þéttivatni (mg/kg)					
Cl	0,01	0,02	0,07	0,32	0,04
B	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Samsætur í þéttivatni (‰SMOW)					
δ ¹⁸ O	-14,69	-15,32	-16,26	-18,14	-15,04
δD	-113,1	-119,8	-114,4	-119,2	-129,6



Mynd 26. Gasstyrkur í gufu og samsætuhlutföll í þéttvatni úr gufuaugum á Þeistareykjum.

Tafla 3. Reiknaður efnahiti ($^{\circ}\text{C}$) gufusýna áráanna 2012–2019 frá Þeistareykjum. 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
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
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
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
20180182	G-104	268	274	328	309	316	315	302	24
20170178	G-104	272	274	316	313	314	309	300	20
20150249	G-104	273	285	320	288	320	308	299	20
20130252	G-104	275	285	335	318	299	300	302	22
20120185	G-104	271	278	311	305	321	310	299	20
20150251	G-105	(375)	(318)	(347)	246	253	254	251	4
20140268	G-105	(358)	(306)	(305)	254	257	245	252	6
20130255	G-105	(343)	(293)	(322)	256	252	256	255	2
20120186	G-105	(346)	(291)	(314)	261	261	261	261	0
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
20180178	G-108	261	283	(343)	287	314	315	292	23
20150263	G-108	262	285	(347)	277	306	311	288	20
20190185	G-110	(339)	289	(347)	299	292	298	294	5

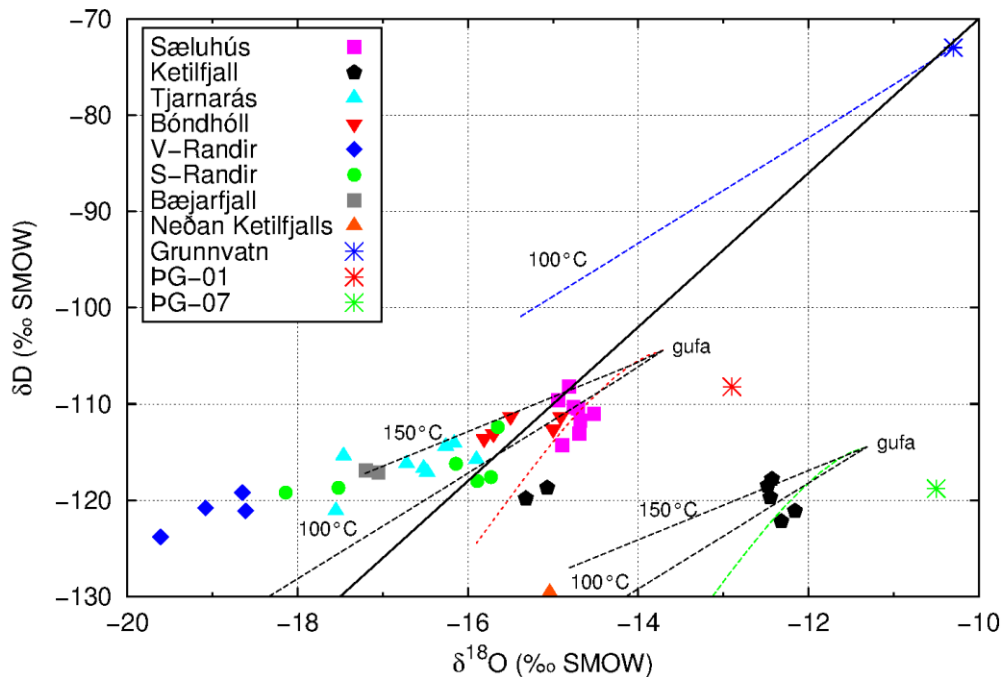
Þ G-101: Talsverðar sveiflur hafa orðið í styrk gastegunda í gufu úr G-101 og forverum þess við lækinn neðan sæluhússins á Þeistareykjum frá því fyrstu sýnum var safnað þar haustið 1981, sérstaklega á árunum 1993–1997. Síðan 2012 hefur styrkur flestra gastegunda þó verið á svipuðu róli og þegar fyrstu sýnum var safnað 1981. Sýnið frá 2019 er heldur gasríkara en flest sýni en þó svipað og sýnið frá 2017. Nú mælist CO₂-styrkur 83 mmól/kg, styrkur H₂S 20 mmól/kg og styrkur H₂ um 17 mmól/kg, sem er umtalsvert hærri en árið 2018. Meðalgashiti reiknast því hærri en verið hefur, um 304°C, en flest sýni frá 2012 hafa gefið gashita 290–300°C. Ágætt samræmi er milli flestra gashitamællanna. Svolítið lækkun á tvívetrishlutfallinu frá 2018 er að hluta til gengin til baka en enn sjást litlar breytingar á samsætu hlutfalli súrefnis.

Þ G-102: Gasstyrkur sýna sem safnað hefur verið úr G-102 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 er í lægri kantinum; styrkur CO₂ er 157 mmól/kg en H₂S og H₂ eru um 46 og 40 mmól/kg. Vetrishstyrkur hefur þó verið á hægri en nokkuð jafnri niðurleið allar götur frá 2014 en styrkur H₂ er þó enn hærri en jafnvægi við steindir gefur til kynna. Af þeim sökum reiknast óeðlilega hár H₂-gashiti. Meðalgashiti að H₂-mælinum slepptum reiknast 306°C sem er svipað og verið hefur. Gufan úr G-102 hefur skorið sig úr á gufuaugunum á Þeistareykjum hvað varðar súr-efnishliðrun, sem hefur numið um 4% þar en er óveruleg eða neikvæð í öðrum gufuaugum. Þetta bendir til þess að vökvinn sem gufan sýður upp af hafi haft umtalsverð efnaskipti við berg. Hins vegar ber svo við í sýnum frá 2018 og 2019 að gufan virðist innihalda mun minna af ¹⁸O en áður (þ.e. hefur neikvæðara δ¹⁸O og fellur því nær sýnum frá Þeistareykjagrundum (mynd 27).

Þ G-103: Gasstyrkur í Tjarnarási (augu G-103 og G-107) er svolítið hærri en á Þeistareykja-grundum (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 117 mmól/kg en H₂S og H₂ mælast um 31 og 17 mmól/kg. Gashitagildum ber ágætlega saman og reiknast meðalgashiti 300°C, sem ber prýðilega saman við síðustu ár (að teknu tilliti til þéttingar sýnisins frá 2016). Samsætu hlutföllin breytast fremur lítið milli ára; δD mælist nú um -114‰ og sýnið hefur svolitla neikvæða hliðrun frá úrkomulínunni.

Þ G-109: Sýni ársins 2018 úr G-109 svipaði helst til síns næsta nágranna, hins heillum horfna G-106, en sýnið frá 2019 hefur greinilega orðið fyrir nokkurri gufuþéttingu á leið til yfirborðs. Fyrir vikið er gasstyrkur 3–4 sinnum hærri en 2018. CO₂ mælist nú 195 mmól/kg, H₂S 48 mmól/kg og H₂ um 20 mmól/kg. Sömuleiðis mælist óvenju hár styrkur N₂ og Ar. Þ.a.l. reiknast gashiti byggður á styrk þessara gasa mjög hár. Hins vegar ber gashlutfallamælunum (CO₂/N₂, H₂S/Ar, H₂/Ar) prýðilega saman við gashitagildi fyrri ára og gefa um 277°C. Gufuþétting kemur sömuleiðis fram í samsætugildum en sýnið frá 2019 er léttara en sýnið frá 2018 og talsvert frábrugðið eldri sýnum úr G-106.

Þ G-110: Sýnum hefur ekki áður verið safnað undir Ketilfjalli enda hefur yfirborðsvirknin ekki verið nægilega kraftmikil til þess fyrr en nú í sumar. Gasstyrk í gufu svipar mjög til gufuauga G-102 enda er stutt milli sýnatökustaðanna. Þó hefur þetta sýni talsvert hærri styrk koldíoxíðs (201 mmól/kg) og metans (1,2 mmól/kg) en sýnið úr G-102. Vera kann að þessi viðbót stafi af niðurbroti lífrænna efna í jarðveginum. Meðalgashiti reiknast 294°C. Súrefnissamsætur eru áþekkar sýni þessa árs úr G-102 en tvívetrishgildi eru um 10% lægri en í G-102. Hugsanlegt er að um sé að ræða þéttingu á „dæmigerðri“ gufu úr G-102 (þ.e. gufu líkri þeirri sem safnað var árin 2012–2017) þótt reyndar bendi gasstyrkur í gufunni ekki til teljandi þéttingar.



Mynd 27. Samsætuvið sýna árunna 2012–2019 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 ÞG-1 (rauður) og ÞG-7 (grænn), svo og þéttingu frumgufu úr ÞG-1 og ÞG-7 við 100°C og 150°C (svartir).

2.2.3 Samantekt

Greinilegt er að talsverðar breytingar hafa orðið á virkni og gassamsetningu í gufuaugum á Þeistareykjum á 10. áratug síðustu aldar, eins og Halldór Ármannsson (2004) hefur rakið. Samanburður við árið 1981 bendir hins vegar til þess að kerfið sé nú að mestu í svipuðu ástandi og þá. Helsti munurinn liggur í því að gasstyrkur hefur hækkað talsvert í Ketilfjalli, einkum styrkur vetnis, þótt vetnisstyrkur hafi raunar farið lakkandi síðan 2014. Síðan 2012 hefur hins vegar ekki verið að sjá verulegar breytingar milli ára, þótt stöku sýni skeri sig úr, vegna þéttingar gufu eða loftmengunar.

Sjá má á gassamsetningunni, einkum styrk H_2 og N_2 , að svæðið í Röndum, þar sem gufuaugu G-105, G-106 og G-109 eru, reiknast heldur kaldara en hin svæðin, eða um 250–280°C, samanborið við 300°C í Tjarnarási (augu G-103 og G-107) og á Þeistareykjagrundum (augu G-101 og G-104) og um 310°C í Ketilfjalli (G-102). Sýni úr nýlifnuðum leirskellum neðan undir Ketilfjalli (G-110) hefur hærri styrk koldíoxíðs og metans en dæmigert er fyrir Þeistareykjasvæðið, en háan vetnisstyrk líkt og í G-102. Meðalgashiti (að CO_2 - og H_2 -gashitamælunum slepptum) reiknast 294°C. Mólhlutfallið CO_2/H_2S reiknast á bilinu 3,4–4,2 í sýnum ársins 2019, nema sýninu úr G-110 þar sem hlutfallið er 6,0. Styrkur vetnis í gufunni er almennt frekar hár á austanverðu svæðinu, 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 bendir til djúpgufu í kerfinu, þ.e. að vökvinn í jarðhitageyminum sé tvífasa.

Styrkur Cl og B í þéttivatni er lægri en 0,1 mg/kg í flestum sýnum sem bendir til þess að lítil kvikuáhrif eða meðburður vatns séu til staðar. Þó mælist hærri klóríðstyrkur (0,34 mg/L) í þéttivatni úr G-109 á Röndum en hann má líklega rekja til meðburðar vatns.

Tvívetnisgildi gufunnar í sýnum áráanna 2012–2018 spanna bilið -108 til -124‰ en allra lægstu gildin eru fyrir sýni sem greinilega hafa þést á leið til yfirborðs (úr G-105, G-102 og G-103, sýni sem jafnframt hafa óvenju lág $\delta^{18}\text{O}$). Hið sama á við um sýni ársins 2019 úr G-109 og hugsanlega á það líka við um sýnið úr G-110 en það er enn lægra í tvívetni, með δD -130‰. Tvívetnisgildin eru almennt hæst á Þeistareykjagrundum (G-101 og G-104) en lægst í Ketilfjalli (G-102). Sýni frá Þeistareykjagrundum og sunnanverðum Röndum falla á úrkomulínuna, sýni úr Ketilfjalli hafa jákvæða súrefnishliðrun en sýni úr Tjarnarási, Bæjarfjalli og vestanverðum Röndum sýna neikvæða súrefnishliðrun (mynd 27). 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. Línur sem sýna slíka þéttingu frumguflu sem myndast við suðu djúpvökva holu ÞG-1 eru sýndar með svörtum brotalínunum á mynd 27, reiknaðar út frá jöfnum Horita og Wesolowski (1994). 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 nýjustu tvö sýnin úr G-102 sýna miklu minni súrefnishliðrun en eldri sýni og falla nær sýnum af Þeistareykjagrundum en eldri sýni (mynd 27). Rétt er að minna á að þessi tvö ár (2018 og 2019) var sýnum safnað úr suðurhluta skálarinnar í Ketilfjalli en ekki norðurhlutanum líkt og flest undangengin ár.

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 jarðhita-vökvinn. Þannig eru samsætuhlutföll vatnsins úr vatnsbóli Þeistareykja undir Ketilfjalli $\delta\text{D} \approx -72,1\text{‰}$ og $\delta^{18}\text{O} \approx -10,4\text{‰}$ (sjá töflu 17) meðan samsætuhlutföll djúpvatns í holu ÞG-1 eru $\delta\text{D} \approx -108\text{‰}$ og $\delta^{18}\text{O} \approx -12,7\text{‰}$ og djúpvatn í holu ÞG-9 hefur $\delta\text{D} \approx -119\text{‰}$ og $\delta^{18}\text{O} \approx -10,5\text{‰}$ (Finnbogi Óskarsson, 2011, 2012b). Þessir gagnapunktur eru sýndir á mynd 27 og þar eru jafnframt sýnd með blárri, slitróttu línu samsætuhlutföll guflu sem myndast við suðu vatnsins úr vatnsbólinu 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 -108 til -100‰ og 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 Ketilfjalli virðist hins vegar vera sömu ættar og vökvinn í holu ÞG-9 og gæti verið mynduð við suðu á honum. Á mynd 27 eru sýnd samsætuhlutföll guflu sem myndast við suðu djúpvatns úr ÞG-1 (rauður ferill) og ÞG-9 (grænn ferill) frá djúphita niður í 100°C, auk þéttingar gufunnar sem myndast við slíka suðu, allt reiknað út frá jöfnum Horita og Wesolowski (1994).

3 Krafla

3.1 Efnasamsetning gufu úr gufuaugum í Kröflu

3.1.1 Sýnatökustaðir í Kröflu

Premur gufusýnum var safnað í Kröflu þriðjudaginn 10. september í þungbúnu en þökkalegu veðri. Yfirlit um sýnatökustaði er í töflu 4 og staðsetning þeirra sýnd á mynd 28 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. Kristinnsson o.fl., 2013a; 2013b; 2014; 2015; 2016; 2017; 2018).

Sýnum var safnað úr þremur gufuaugnanna sem safnað var úr sumarið 2018; G-104 í hlíðum Leirhnjúks, G-107 í gígskál norðan Vítis og G-106 í gili neðan holu K-14. Sýnatöku- og efna- greiningaraðferðum er lýst í viðauka 1.

Sýnatökustöðunum þremur sem safnað var úr 2019 er lýst nánar hér á eftir. Í gagnagrunni ÍSOR eru sýnatökuaugu árána 2012–2019 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 að neðan eru nöfn gufuaugna víða stytt í „G-101“ til einföldunar.

Tafla 4. Sýnatökustaðir í Kröflu sumarið 2019.

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

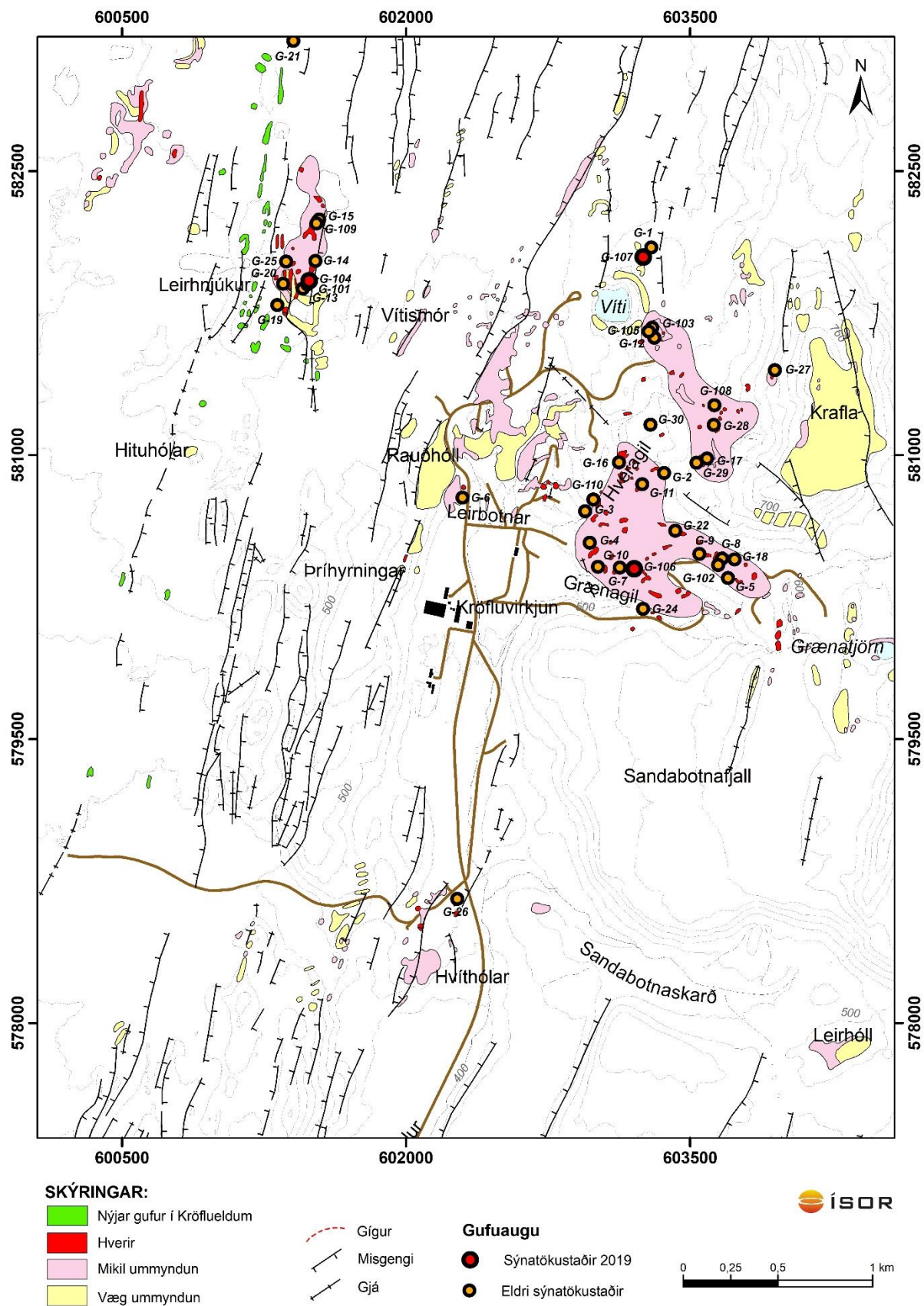
* Nöfn gufuaugna eru stytt. Fullt nafn í gagnagrunni ÍSOR er „K G-104“ o.s.frv.

** 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 28 og 29). Þetta auga er hið neðsta þriggja álitlegra 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 gnótt góðra sýnatökustaða, m.a. á nærliggjandi hryggjum.

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 28 og 30). Fleiri álitleg augu voru í þessari skellu en aðgengi var þægilegast að þessu. Einnig var nokkur virkni neðar í gili. Virkni í kringum augað er svipuð og undanfarin ár en skellan er orðin nokkuð mikið 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 var austarlega í skellunni allkröftugt, vel aðgreint og aðgengilegt (myndir 28 og 31), á nokkurn veginn sama stað og safnað var árið 2017 en árið 2018 var sýni safnað neðarlega í skellunni vestanverðri.



Mynd 28. Gufuaugu í Kröflu. Gufuaugu sem safnað var úr sumarið 2019 eru sýnd með rauðum táknum.



Mynd 29. Gufuaugað K G-104 í austurhlíð Leirhnjúks.



Mynd 30. Undirbúningur gufusýnatöku úr gufuauganu K G-106 í gili vestan við holu K-14.



Mynd 31. Undirbúningur sýnatöku úr gufuauganu K G-107 í gígskál norðan Vítis.

3.1.2 Niðurstöður gufuefnagreininga

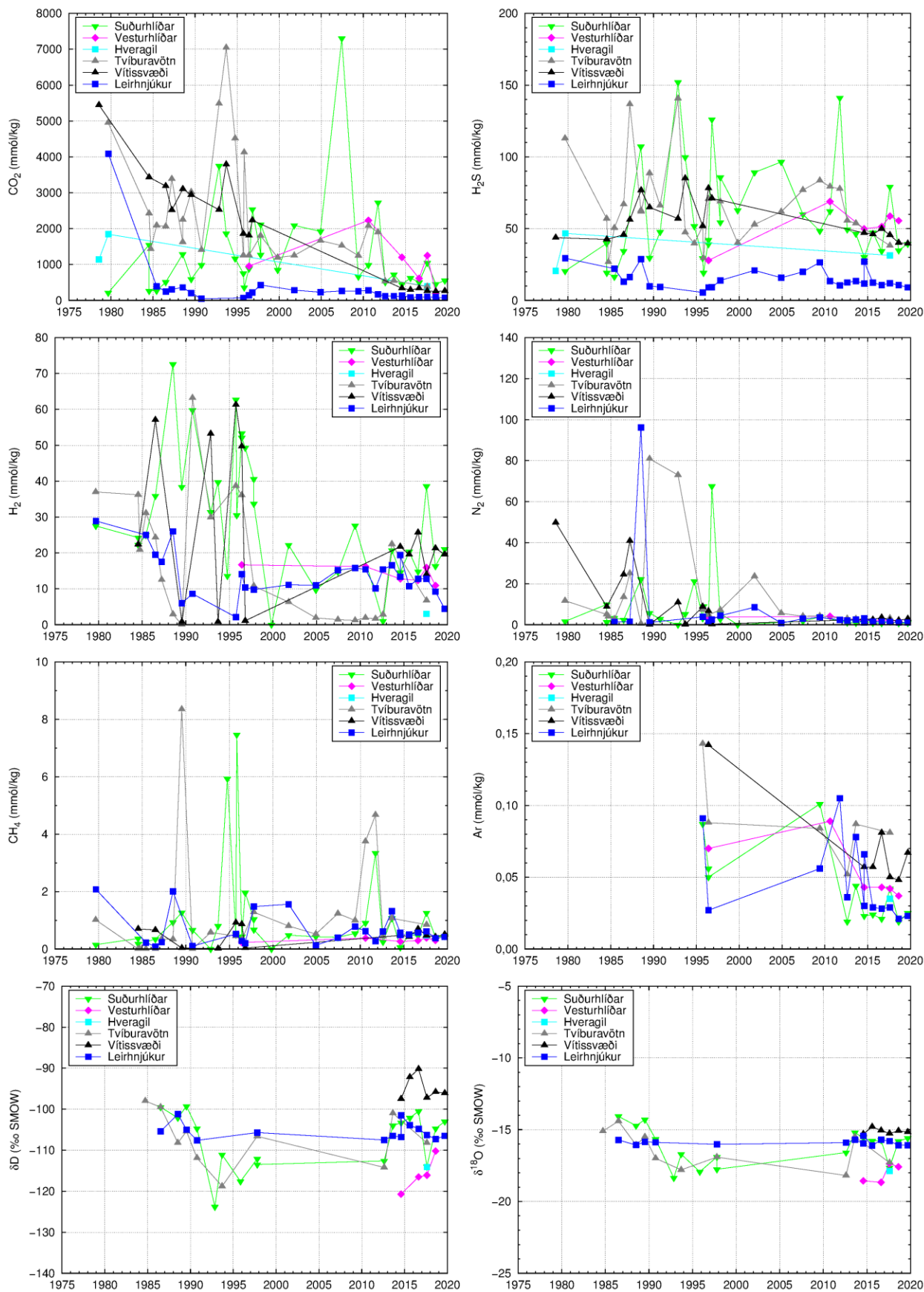
Niðurstöður efnagreininga sýna sem tekin voru á Kröflusvæðinu sumarið 2019 eru skráðar í töflu 5 og teiknaðar á mynd 32 ásamt efnasamsetningu eldri sýna úr öðrum gufuaugum á svipuðum slóðum. Auk sýnanna sem safnað var í september 2019, G-104, G-106 og G-107, eru sýnd gögn frá öðrum augum á sömu slóðum. Þar er um að ræða gufuaugun G-15, G-19, G-101 og G-109 í Leirhnjúki, G-5, G-7 og G-102 í Suðurhlíðum, G-12 og G-103 við Tvíburavötn austan Vítis, G-1 í gígskál norðan Vítis, G-108 og G-38 í Vesturhlíðum og G-3 og G-110 í Hveragili. Sýnum sem eru augljóslega menguð andrúmslofti er sleppt á myndum af N₂ og Ar. Samsætu-
vik í sýnum safnað síðan 2012 er teiknað á mynd 33 ásamt úrkomulínu Craigs (1961).

Efnagreiningar eldri sýna eru fengnar úr skýrslum og gögnum ÍSOR og Orkustofnunar, skýrslum Jóns Benjamínssonar (1985, 1999), Jóns Benjamínssonar og Trausta Haukssonar (1988, 1989, 1990, 1993, 1994, 1995, 1996, 1998, 2000, 2001, 2004, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012), Stefáns Arnórssonar o.fl. (1995; 1996) og Sigurðar G. Kristinssonar o.fl. (2013a; 2013b; 2014; 2015; 2016; 2017; 2018).

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 (CO₂) og pýrít-pýrrhótít-prehnít-epidót (H₂S og H₂). Fyrir Vítissvæði, Vesturhlíðar og Suðurhlíðar er notuð sú kvörðun CO₂-hitamælisins sem gerir ráð fyrir talsverðu CO₂-flæði frá kviku, þrátt fyrir að það hafi dregist saman miðað við árin um og eftir Kröfluelda. Þessi kvörðun CO₂-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 CO₂-flæði frá kviku.

Tafla 5. Efnasamsetning gufusýna úr Kröflu sumarið 2019.

Sýni	20190177	20190179	20190178
Dagsetning	10.9.2019	10.9.2019	10.9.2019
Staður	K G-104	K G-106	K G-107
Hitastig (°C)	97,5	97,6	97,4
Gasstyrkur í gufu (mmól/kg)			
CO ₂	71,6	552	261
H ₂ S	9,0	39,3	39,6
H ₂	4,41	21,0	19,6
CH ₄	0,419	0,452	0,509
N ₂	1,07	0,86	2,90
O ₂	<0,01	<0,01	<0,01
Ar	0,023	0,025	0,067
Steinefni í þéttivatni (mg/kg)			
Cl	0,03	0,16	0,03
B	<0,005	<0,005	<0,005
Samsætur í þéttivatni (‰SMOW)			
δ ¹⁸ O	-16,08	-15,59	-15,17
δD	-106,5	-103,0	-96,1



Mynd 32. Gasstyrkurur í gufu og samsætuhlutföll í þéttivatni úr gufuaugum í Kröflu.

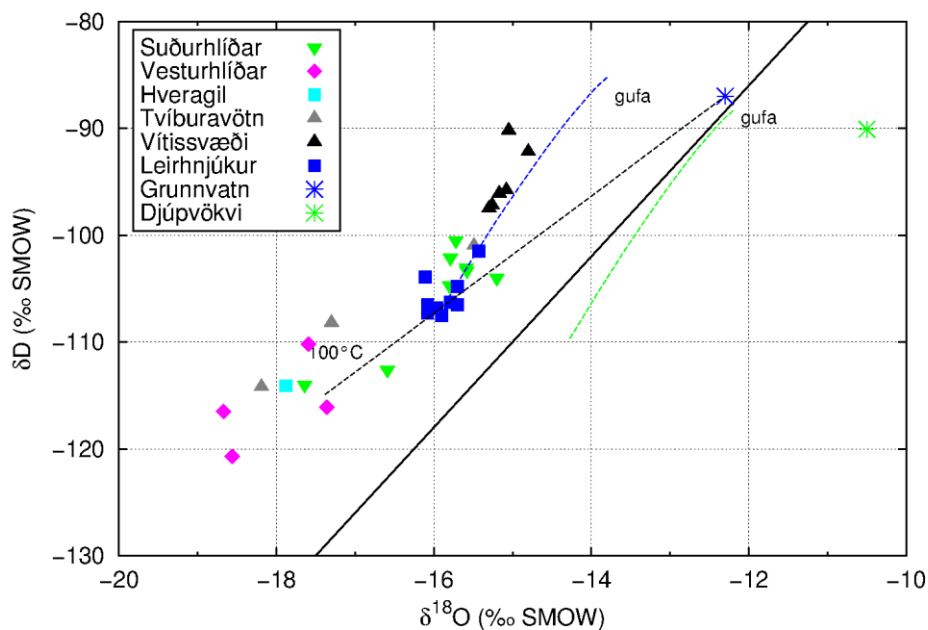
Tafla 6. Reiknaður efnahiti ($^{\circ}\text{C}$) gufusýna áráanna 2012–2019 af Kröflusvæðinu, skipt eftir svæðum. Notast er við kvarðanir Stefáns Arnórssonar o.fl. (1998). Tölum í sviga er sleppt við útreikninga á meðaltali ($\bar{x}$) og staðalfrávik (σ).

Sýni	Auga	T _{CO2}	T _{H2S}	T _{H2}	T _{CO2/N2}	T _{H2S/Ar}	T _{H2/Ar}	$\bar{x}$	σ
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
20170167	G-105	315	294	281	323	280	255	292	25
20130249	G-105	333	306	330	346	(288)	(278)	329	16
20120190	G-103	332	308	(254)	342	303	(247)	321	19
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
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
20181085	G-108	288	308	299	318	313	281	301	15
20170168	G-108	(379)	310	315	(406)	311	286	305	13
20160241	G-108	(339)	305	304	(366)	307	280	299	12
20140255	G-108	(377)	304	305	(403)	306	281	299	12
20170172	G-110	317	287	256	365	298	256	297	41

K G-104: Styrkur CO₂ og H₂S hefur jafnan verið mun lægri í Leirhnjúk en í hlíðum Kröflu og svo er enn (heildargasstyrkur í nýjasta sýninu úr austurhlíð Leirhnjúks er 86,5 mmól/kg en 324 og 614 mmól/kg í gufuaugunum í Suðurhlíðum og við Víti). Gasstyrkur í sýni ársins 2019 er lægri en undanfarin ár. Styrkur CO₂ mælist nú aðeins 72 mmól/kg en H₂S mælist 9,0 mmól/kg og H₂ 4,4 mmól/kg. Styrkur CH₄, N₂ og Ar er svipaður og fyrri ár. Reiknaður meðalgashiti fyrir sýnið frá 2019 er 279°C sem er 10–15°C lægra en gashiti síðustu ára, að H₂S-hitamælinum slepptum.

K G-106: Gasstyrkur í auga G-106 í Suðurhlíðum mælist um 614 mmól/kg, sem er litlu herra en undangengin ár, en var ríflega tvöfalt herra árið 2017. Það var rakið til þéttingar gufunnar á leið sinni til yfirborðs en þétting var sömuleiðis orsakavaldur óvenju lágra samsætugilda. Samsætugildi fyrir sýni ársins 2019 eru hins vegar á svipuðu róli og vant er. Meðalefnahiti fyrir nýjasta sýnið reiknast 315°C en hefur alla jafna verið sjónarmun lægra; um 310°C. Í meðaltalinu er H₂-mælinum alla jafna sleppt þar sem hann gefur ótrúlega hátt gildi.

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 324 mmól/kg sem er mjög svipað og 2018. Þar af var CO₂ 261 mmól/kg, H₂S 40 mmól/kg og H₂ 20 mmól/kg. Gashitamælar gefa meðaltalið 299°C fyrir sýnið frá 2019 en það er á svipuðu róli og fyrri ár.



Mynd 33. Samsætuvík sýna áráanna 2012–2019 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.

3.1.3 Samantekt

Gufan sem stígur upp af hlíðum Kröflu og Vítissvæðinu er mun gasríkari en gufan í Leirhnjúk. Samanlagður gasstyrkur í sýnum ársins er um 87 mmól/kg í Leirhnjúk, 324 mmól/kg við Víti og 614 mmól/kg í Suðurhlíðum. Gasstyrkur í gufu í Leirhnjúki lækkar nokkuð milli ára, líkt og undanfarin ár, og á það við um „jarðhitagösin“ CO₂, H₂S og H₂ en styrkur CH₄, N₂ og Ar helst stöðugur milli ára. Mólhlutfallið CO₂/H₂S reiknast 14 í Suðurhlíðum, 6,6 við Víti, og 7,9 í Leirhnjúk. Sögulega virðist gasstyrkur flökta meira í Suðurhlíðum en á hinum svæðunum. Styrkur Cl mælist nú alls staðar lægri en 0,2 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 Hauksyni, 1998). Styrkur B í þéttivatni mælist lægri en 0,005 mg/kg í öllum sýnum.

Undanfarin ár hefur meðalgashiti reiknast 300–315°C í hlíðum Kröflu en heldur lægri í Leirhnjúki, um 290–295°C, en nú reiknast meðalgashiti í Leirhnjúki aðeins 279°C. Almennt ber gashitamælunum vel saman en helstu frávik eru að H₂S-hitamælarnir gefa lægri gildi en hinir hitamælarnir fyrir Leirhnjúkssýnin og að CO₂-hitamælarnir hafa gefið mjög há gildi 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 33 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) en meðal-samsætugildi fyrir djúpvökvann eru sýnd með grænni stjörnu á mynd 33. 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 33 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.

4 Námafjall

4.1 Efnasamsetning gufu úr gufuaugum í Námafjalli

4.1.1 Sýnatökustaðir

Premur gufusýnum var safnað á Námafjallssvæðinu dagana 10. og 12. september í óþarflega blautu veðri fyrri daginn en þungbúnu en annars þrýðilegu veðri síðari daginn. 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-110 upp af virka svæðinu ofan gilsins í austurhlíð Námafjalls. Sýnatöku- og efnagreiningaraðferðum er lýst í viðauka 1.

Yfirlit um sýnatökustaði er í töflu 7 og staðsetning þeirra er sýnd á mynd 34 ásamt öðrum gufuaugum sem sýni hafa verið tekin úr í Námafjalli og Bjarnarflagi. Á mynd 34 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 Línal (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 2019 í Námafjalli er lýst frekar hér á eftir. Í gagnagrunni ÍSOR eru sýnatökuaugu árána 2012–2019 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 stýtt í „G-101“ til einföldunar.

Tafla 7. Sýnatökustaðir í Námafjalli sumarið 2019.

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-110	H 93571	600362	572850	477	Ofan gilsins austur úr fjallinu

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

N G-105: Ágætlega kraftmikið gufuauga með afgerandi streymi framarlega í grunnu gili sem liggur norður frá holu B-9 í Bjarnarflagi (myndir 34 og 35). Talsverð virkni teygir sig upp eftir allri austurhlíð gilsins, og virðist heldur færast í aukana, en 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 34 og 36).

N G-110: Frekar öflugt gufustreymi úr brennisteinsþúfu á fremur lítilli leirskellu nokkru ofan við syðri gilskorninginn sem gengur austur úr fjallinu (myndir 34 og 37).



Mynd 35. Gufuaugað N G-105 í austurbarmi gils upp af stöðvarhúsinu í Bjarnarflagi.



Mynd 36. Undirbúningur sýnatöku úr gufuauga N G-106 í flagi vestan holu H-9 á Hverum.



Mynd 37. Sýnataka úr gufuauga N G-110 á Námafjalli, í leirskellu ofan syðra gilsins.

4.1.2 Niðurstöður gufuefnagreininga

Niðurstöður efnagreininga sýna sem tekin voru við Námafjall sumarið 2019 eru skráðar í töflu 8. Mynd 38 sýnir styrk CO_2 , H_2S , H_2 , N_2 , CH_4 og Ar í gufuaugum á Námafjalli, Hverum og í Bjarnarflagi í tímans rás. Einnig eru þar sýnd gögn úr öðrum augum af sömu slóðum þar sem þeim er til að dreifa. Efnagreiningar eldri sýna eru fengnar úr skýrslum Stefáns Arnórssonar o.fl. (1995; 1996), Jóns Benjamínssonar og Trausta Haukssonar (2010, 2011, 2012) og Sigurðar G. Kristinssonar o.fl. (2013a; 2013b; 2014; 2015; 2016; 2017; 2018). Á myndunum fyrir N_2 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. Samsætuvik í sýnunum er teiknað á mynd 39 ásamt úrkomulínu Craigs (1961).

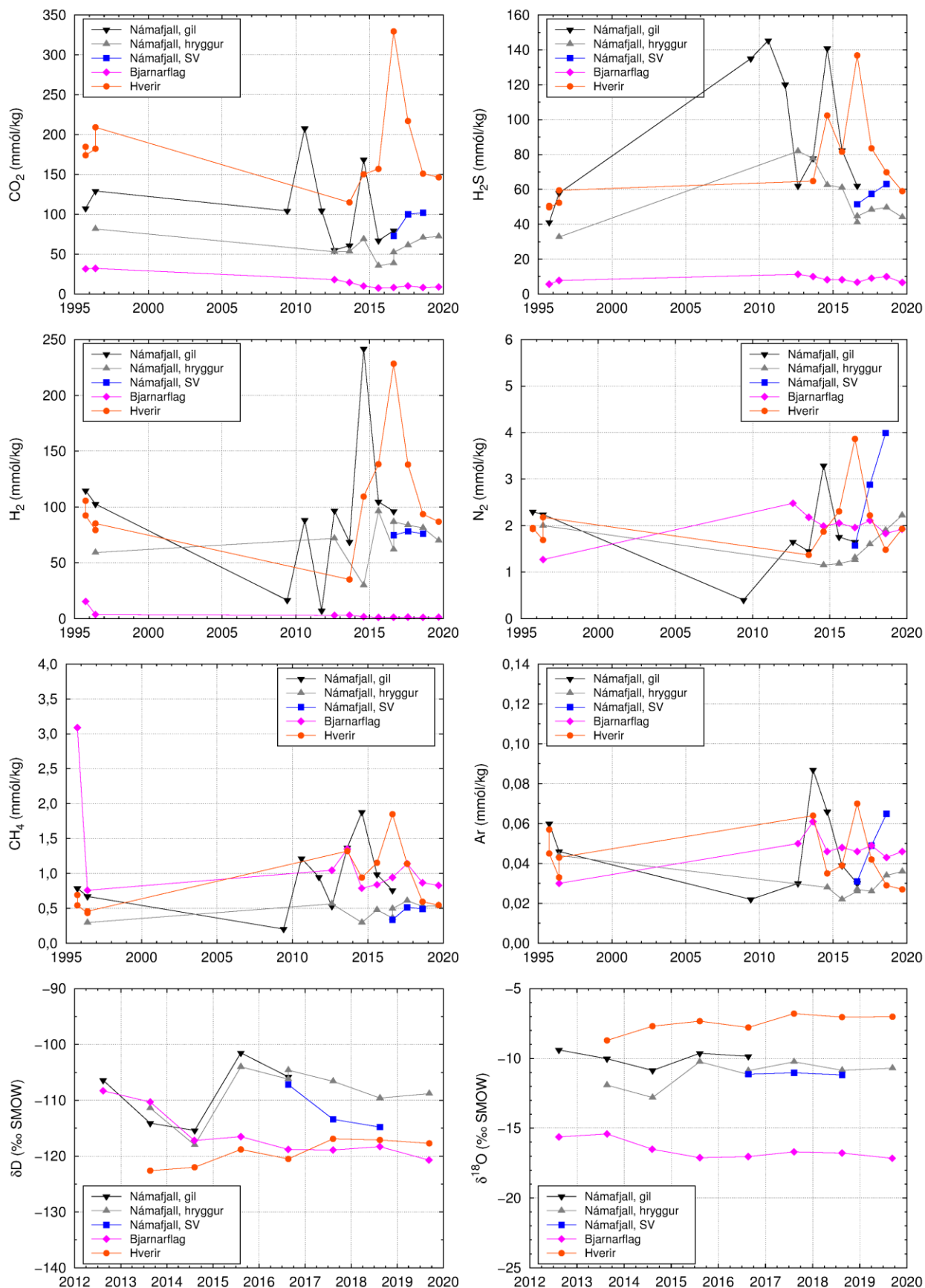
Í töflu 9 er sýndur reiknaður djúphiti út frá mældum styrk hinna ýmsu gastegunda. Notast er við kvarðanir Stefáns Arnórssonar o.fl. (1998) sem reiknaðar eru út frá ætluðu jafnvægi við steindafylkin klínózóisít-kalsít-kvars-prehnít (CO_2) og pýrít-pýrrhótít-prehnít-epidót (H_2S og H_2). Fyrir Námafjall er notuð sú kvörðun CO_2 -hitamælisins sem gerir ekki ráð fyrir miklu CO_2 -flæði frá kviku.

Tafla 8. Efnasamsetning gufusýna frá Námafjallssvæðinu sumarið 2019.

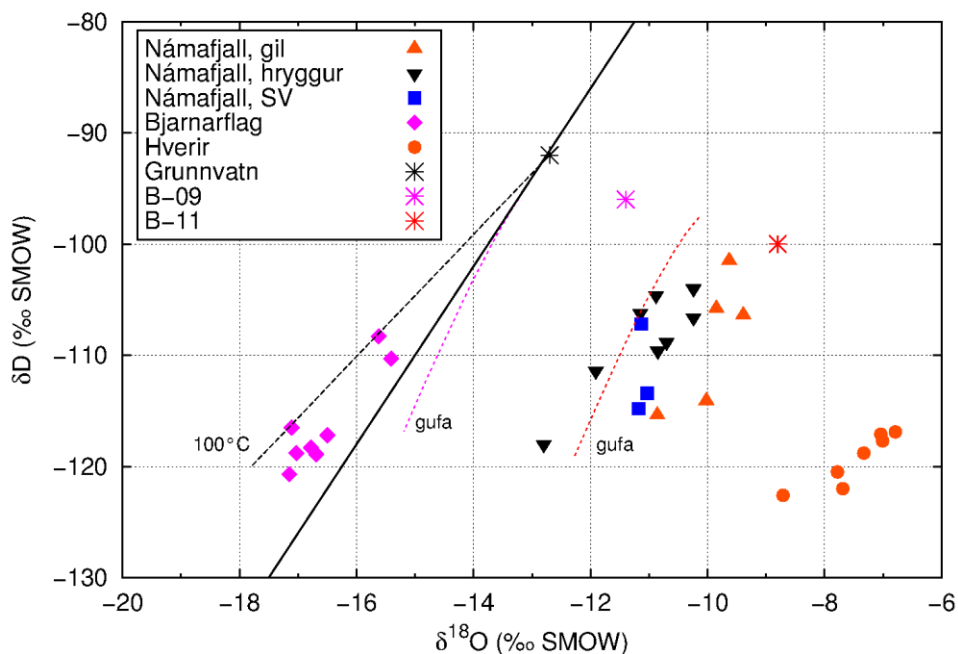
Sýni	20190180	20190186	20190187
Dagsetning	10.9.2019	12.9.2019	12.9.2019
Staður	N G-105	N G-106	N G-110
Hitastig (°C)	98,7	97,8	97,8
Gasstyrkur í gufu (mmól/kg)			
CO ₂	8,79	146	72,3
H ₂ S	6,60	59,0	44,0
H ₂	1,30	86,8	69,9
CH ₄	0,829	0,545	0,538
N ₂	1,92	1,93	2,22
O ₂	<0,01	0,03	<0,01
Ar	0,046	0,027	0,036
Steinefni í þéttivatni (mg/kg)			
Cl	0,03	0,01	0,03
B	<0,005	<0,005	<0,005
Samsætur í þéttivatni (‰SMOW)			
δ ¹⁸ O	-17,15	-7,01	-10,70
δD	-120,7	-117,7	-108,8

Tafla 9. Reiknaður efnahiti ($^{\circ}\text{C}$) gufusýna áráanna 2012–2019 frá Námafjallssvæðinu, skipt eftir svæðum. 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
20190187	G-110	282	299	(392)	270	307	319	296	19
20180189	G-110	281	304	(402)	275	313	324	299	21
20170173	G-110	275	303	(404)	276	320	330	301	25
20160239	G-110	267	300	(406)	278	317	330	298	26
20160236	G-108	254	297	(385)	268	315	324	292	30
20150253	G-108	251	311	(413)	267	332	336	299	38
20140271	G-107	280	312	(344)	294	325	307	304	17
20130258	G-101	268	320	(446)	(147)	(208)	(247)	294	36
20120191	G-101	268	322	(394)	(183)	(262)	(274)	295	38
20160238	G-102	287	312	(413)	285	323	330	307	21
20150254	G-102	279	322	(419)	276	324	326	305	25
20140270	G-102	329	342	(484)	287	324	332	323	21
20130259	G-102	274	320	(391)	280	298	301	295	18
20120192	G-102	269	312	(414)	271	327	333	302	30
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
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
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 38. Gasstyrkur í gufu og samsætuhlutföll í þéttvatni úr gufuaugum á Námafjallssvæðinu.



Mynd 39. Samsætuvið sýna áráanna 2012–2019 úr gufuaugum á Námajfallssvæðinu ásamt úrkomulínu Craigs (1961). Einnig eru sýndir ferlar fyrir suðu grunnvatns við 100°C (svartur) og gufu sem myndast við þrýstifallssuðu djúpvatns úr B-9 (bleikur) og B-11 (rauður).

N G-105: Styrkur CO_2 í gílinu ofan B-9 er mjög lágur; hann var á bilinu 59–67 mmól/kg árin 1995 og 1996 en 18 mmól/kg árið 2012 og lækkaði áfram næstu árin. Síðan 2015 hefur styrkurinn verið nærri 8 mmól/kg og mældist 8,8 mmól/kg í sýninu ársins 2019. Svipaða sögu er að segja af styrk H_2S og H_2 en styrkur beggja gastegunda, sem var á bilinu 20–25 mmól/kg árin 1995 og 1996, mældist nú 6,6 og 1,3 mmól/kg. Styrkur annarra gastegunda breytist minna. Efnahitamælum ber ágætlega saman, bæði innbyrðis og milli ára, og reiknast efnahiti að meðaltali 227°C í sýni ársins 2019. Gufan úr G-105 er mjög létt ($\delta\text{D} \approx -118\text{‰}$) og litlar breytingar er að sjá á samsætuhlutföllum undanfarin ár. Hins vegar höfðu sýni sem safnað var úr G-103 árin 2012 og 2013 heldur meira af þyngri samsætum en sýnin úr G-105.

N G-106: Gufan úr G-106 er talsvert gasríkari en gufa úr öðrum sýnatökustöðum í Námajfalli, heildargasmagn er um 295 mmól/kg, þar af 87 mmól/kg af H_2 . Þessi háí vetnisstyrkur bendir til þess að djúpgufa sé til staðar í kerfinu. CO_2 og H_2S hafa einnig háan styrk, 146 og 59 mmól/kg. Fyrir vikið reiknast meðalgashiti talsvert hár, eða 318°C, þótt þar sé sleppt gríðarháu gildi úr vetnishitamælinum. Tvívetnishlutfall gufunnar á Hverum er afar lágt ($\delta\text{D} \approx -118\text{‰}$) og gufan sýnir mikla súrefnishliðrun (um 9‰; mynd 39) sem bendir til mikilla efnaskipta djúpvökvans við berg. Svolítillar loftmengunar varð vart í sýninu frá 2019.

N G-110: Gasstyrkur í gufuauga G-110 á hrygg Námajfalls er mjög sambærilegur því sem mældist í eldri sýnum úr gufuaugum G-107 og G-108, enda er stutt á milli sýnatökustaðanna. Heildargasstyrkur mældist um 189 mmól/kg. Styrkur CO_2 , H_2S og H_2 mældist 72 mmól/kg, 44 mmól/kg og 70 mmól/kg, í sömu röð. Líkt og gildir um önnur sýni á hrygg Námajfalls sýnir H_2 -hitamælirinn kerfisbundið hærri gildi en aðrir hitamælar og er honum því sleppt í útreikningi á meðalgashita, sem þá reiknast 296°C. Samsætuhlutföll í gufunni eru að mestu svipuð og í öðrum sýnum ofan af Námajfalli (myndir 38 og 39).

4.1.3 Samantekt

Talsverður innbyrðis munur er milli þeirra þriggja undirsvæða í Námafjalli þar sem gufu-virkni 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. Kristinnsson o.fl., 2013a; 2016). Mólhlutfallið $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ er 1,3 í Bjarnarflagi, 1,6 á Námafjalli og 2,5 í Hverum. Styrkur Cl og B í þéttivatni er almennt mjög lágur; bórstyrkur mælist alls staðar 0,05 mg/kg eða lægri og sama á við um klóríðstyrk í öllum sýnum.

Afgerandi munur undirsvæðanna þriggja sést einnig í samsætugildunum (mynd 39). Gufan sem kemur upp í Hverum, austast í kerfinu, er mjög létt ($\delta\text{D} \approx -120\text{‰}$) og sýnir mikla súrefnishliðrun (8 til 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 til 5‰ sem bendir til þess að efnaskipti milli bergs og vatns séu ekki gengin jafn langt og í Hverum. Tvívetnisgildi Bjarnarflagsgufunnar eru á bilinu -120 til -108‰ og lægri gildi virðast mælast í G-105 en G-103. Sýnin úr Bjarnarflagi sýna hins vegar svolitla neikvæða súrefnishliðrun (0,5–1,5‰) og liggja því vinstra megin við úrkomulínuna. Það kann að benda til þess að gufan þar sé mynduð við suðu á grunnvatni eða blöndu djúpvatns og grunnvatns.

Í reiknuðum djúpvökva háhitaholna í Bjarnarflagi er δD á bilinu -100 til -90‰ (Darling og Ármannsson, 1989; Finnbogi Óskarsson, 2012a) en í kalda grunnvatninu í Mývatnssveit eru dæmigerð samsætugildi $\delta\text{D} \approx -92\text{‰}$ og $\delta^{18}\text{O} \approx -12,7\text{‰}$ (meðaltal fyrir Vogaflóa; K-558; gögn úr efnagagnagrunni ÍSOR). Ferlar sem sýna samsætuhlutföll gufu sem myndast við suðu grunnvatns við 100°C (svartur) og þrýstifallssuðu djúpvatns úr holum B-9 (bleikur) og B-11 (rauður) eru teiknaðir inn á mynd 39, 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. 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, eða að blöndun innan jarðhitakerfisins í Námafjalli sé lítil þvert á sprungustefnuna.

5 Vöktun grunnvatns í Mývatnssveit, á Peistareykjum og í Kelduhverfi

Í þessum kafla verður greint frá niðurstöðum efnagreininga sem gerðar voru á vatni í tengslum við vöktun grunnvatns í Mývatnssveit, á Peistareykjum og í Kelduhverfi árið 2019. ÍSOR annaðist sýnatöku og efnagreiningar aðalefna en snefilefni voru greind hjá ALS Laboratories í Luleå í Svíþjóð og samsætur súrefnis og vetnis voru greindar hjá Isotech Laboratories í Illinois í Bandaríkjunum. Sýnatöku- og efnagreiningaraðferðum er lýst í viðauka 1. Styrkur brennisteinsvetnis 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. Sýnataka og úrvinnsla er með svipuðum hætti og í þessu verkefni undanfarin ár.

5.1 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. 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). 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 öllum helstu snefilefnum, auk samsætna vetnis og súrefnis.

Á árinu 2019 fór sýnataka fram í september og alls voru tekin sýni á 15 stöðum og önnuðust Heimir Ingimarsson og Magnús Ólafsson, starfsmenn ÍSOR, sýnatökuna samkvæmt verklagi ÍSOR (Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson, 2006b).

Yfirlit um sýnatökustaðina er sýnt í töflu 10 og á mynd 40. Að þessu sinni voru að ósk Landsvirkjunar ekki tekin sýni úr holum AE-10, LUD-5, Stórugjá og Hverfjallsgjá. Dæla í holu AB-2 reyndist biluð og ekki tókst að koma henni í lag. Þá sló dælan í holu LUD-6 ítrekað út rafstöðinni og náðist einungis að dæla úr henni um 200 L.

Tafla 10. Vöktunarstaðir í Mývatnssveit 2019.

Staður	Hnit					
	Staðarnúmer	Sýni nr.	Dagsetning	Hitastig (°C)	X	Y
Krafla-skiljustöð	M-20008	20190212	19.9.2019	89,8	602585	580452
Hlíðardalslækur v/AB-2	V-2356	20190211	19.9.2019	11,6	602549	572138
AB-2 ¹⁾	B-57842				602504	572234
LUD-4	B-58504	20190188	16.9.2019	5,5	601182	571414
LUD-3	B-58503	20190189	16.9.2019	5,1	600780	570018
LUD-2	B-58502	20190191	16.9.2019	5,9	600210	567326
LUD-6	B-58506	20190208	19.9.2019	35,5	598927	570225
LUD-11	B-58521	20190204	18.9.2019	33,8	598375	574067
Bjarnarflagslón	M-20004	20190206	18.9.2019	26,2	598920	573066
Bjarg	H-10080	20190190	16.9.2019	19,3	595981	572967
Helgavogur	H-10082	20190210	19.9.2019	23,5	595660	572213
Grjótagjá	H-10085	20190207	19.9.2019	45,4	597515	571469
Vogagjá	H-10087	20190205	18.9.2019	39,5	597236	570623
Langivogur	H-10088	20190209	19.9.2019	21,1	595991	570334
Vogaflói	K-558	20190213	19.9.2019	6,6	595856	569697
Garðslind	K-556	20190192	16.9.2019	6,3	593816	563105

¹⁾ Sýnataka reynd en dæla biluð og sýni ekki tekið

Djúpdælur eru í vöktunarholum á Mývatnssvæðinu og í töflu 11 er sýnt yfirlit um þær og hve miklu var dælt úr hverri holu við sýnatöku í september 2019.

Tafla 11. Yfirlit um dælt magn við sýnatöku 2019 úr vöktunarholum í Mývatnssveit.

Hola	Staður	Sýni	Hitastig (°C)	Magn (L)
AB-2 ¹⁾	B-57842			
LUD-2	B-58502	20190191	5,9	1555
LUD-3	B-58503	20190189	5,1	2142
LUD-4	B-58504	20190188	5,5	2244
LUD-6 ²⁾	B-58506	20190208	33,5	~200
LUD-11	B-58521	20190204	33,8	3555

¹⁾ Dæla biluð

²⁾ Vandræði við dælingu þegar dæla sló ítrekað út rafmagni

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

- Sýni af affallsvatni frá skiljustöð í Kröflu og úr Bjarnarflagslóni, auk sýna úr Hlíðardalslæk á móts við holu AB-2 og holu LUD-4 sem sýnir hærri styrk arsens og áls en aðrir staðir.
- Sýni úr öðrum borholum.
- Sýni úr heitum, volgum og köldum lindum og gjám.

Niðurstöður efnagreininga eru sýndar í töflu 13 og til glöggvunar eru niðurstöður mælinga á arseni bornar saman við fyrri niðurstöður á myndum 42–46 og fyrir ál á myndum 47–50 líkt og gert hefur verið í fyrri skýrslum um vöktun grunnvatns.

Auk gagna sem sýna niðurstöður fyrir mælingar á arseni og áli eru einnig sýndar niðurstöður mælinga þeirra málma sem tilgreindir eru í reglugerð um varnir gegn mengun vatns nr. 796/1999 (tafla 12). Þessir málmar eru: kopar, sínk, kadmíum, blý, króm og nikkell, auk arsens. Á myndum 51–68 eru sýndar niðurstöður mælinga fyrir þessa sex málma og eru vöktunarstaðir flokkaðir á sama hátt og lýst er hér framar. Á öllum myndum eru sýnd viðeigandi umhverfismörk eins og þau eru sett fram í reglugerðinni (tafla 12). 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 álits sérfræðings í fiskeldi varðandi eitúráhrif áls í fiskeldi og er algengt viðmið að eiturmörk áls sé um 0,3 mg/L gagnvart laxfiskum sem og öðrum fiskum (Bernhard Laxdal, pers. uppl., 2017; Branson, 1993).

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

Umhverfismörk	I	II	III	IV	V
Kopar (Cu)	≤0,0005	0,0005-0,003	0,003-0,009	0,009-0,045	>0,045
Sínk (Zn)	≤0,005	0,005-0,02	0,02-0,06	0,06-0,3	>0,3
Kadmíum (Cd)	≤0,00001	0,00001-0,0001	0,0001-0,0003	0,0003-0,0015	>0,0015
Blý (Pb)	≤0,0002	0,0002-0,001	0,001-0,003	0,003-0,015	>0,015
Króm (Cr)	≤0,0003	0,0003-0,005	0,005-0,015	0,015-0,075	>0,075
Nikkell (Ni)	≤0,0007	0,0007-0,015	0,015-0,045	0,045-0,225	>0,225
Arsen (As)	≤0,0004	0,0004-0,005	0,005-0,015	0,015-0,075	>0,075

Skýringar við töflu 12:

Umhverfismörk I: Mjög lítil eða engin hætt á áhrifum.

Umhverfismörk II: Lítil hætt 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 42–46 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 42. Þar og í affalli frá skiljustöð í Kröflu mælist styrkur arsens ofan við umhverfismörk III (0,015 mg/L) og í Hlíðardalslæk er styrkur arsens rétt ofan umhverfismark II eins og verið hefur undanfarin ár og innan við viðmiðunarmörk fyrir neysluvatn (0,01 mg/L) eins og nánar er sýnt á mynd 4 þar sem niðurstöðum fyrir Bjarnarflagslón hefur verið sleppt til að sýna betur styrk arsens í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk og LUD-4. 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 (0,01 mg/L) og liggur einnig innan við umhverfismörk II eins og sést á mynd 44. Til nánari greiningar á mæligildum fyrir arsen í eftirlitsholum eru niðurstöður

sýndar á mynd 45, 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 43). (Fram hefur komið að vegna bilunar í dælu var ekki unnt að taka sýni úr AB-2 haustið 2019.) Þetta má ugglaustr rekja til minnkandi magns af affallsvatni sem fer frá skiljustöðinni í Kröflu til förgunar í Hlíðardalslæk vegna aukinnar niðurdælingar í borholur í Kröflu. Styrkur arsens í sýnum úr heitum, volgum og köldum lindum er alls staðar innan við umhverfismörk I (0,0004 mg/L) eins og sýnt er á mynd 46, að frátöldum tveimur eldri mælingum úr Grjótagjá. Í sýnum ársins 2019 mældist styrkur arsens innan greiningarmarka (0,00005 mg/L) í Grjótagjá og Vogagjá.

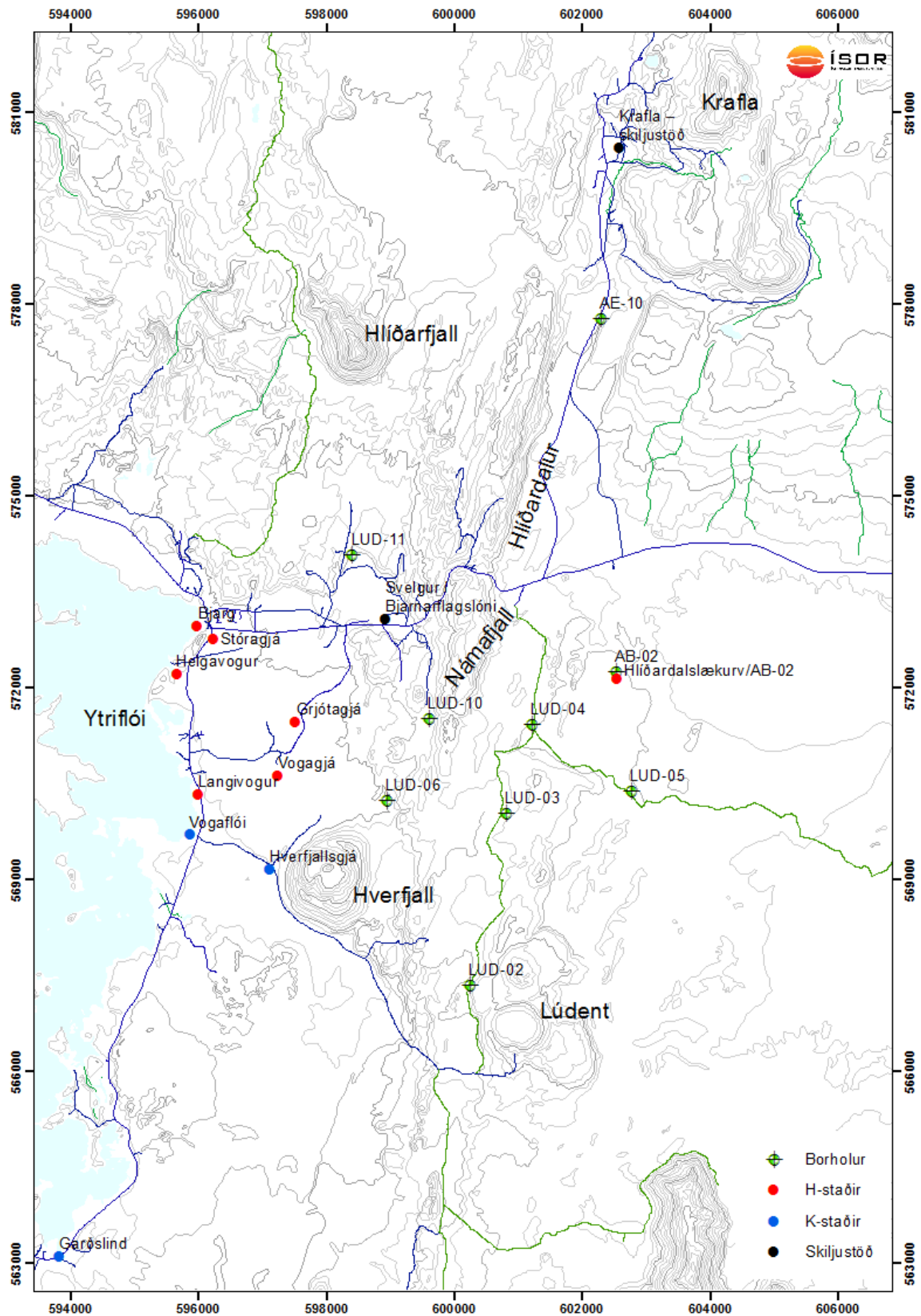
Á myndum 47–50 er sýndur styrkur áls á vöktunarstöðum og litlar markverðar breytingar koma þar fram. Haustið 2018 mældist ál í mjög lágu styrk í Bjarnarflagslóni, líkt og arsen, en haustið 2019 mældist styrkur áls og arsens á svipuðum nótum og verið hefur lengst af frá því mælingar hófust þar. Styrkur 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 47, þó er styrkur áls í LUD-4 rétt við viðmiðunarmörkin (mynd 48). Niðurstöður sýna að styrkur áls í vatni úr vöktunarholunum, nema LUD-4, er alls staðar innan við hámarksgildi fyrir neysluvatn (0,2 mg/L). Mynd 49 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 50 og þar sést að breytingar eru vart marktækar milli áranna 2018 og 2019.

Myndir 51–56 sýna styrk kopars, sínks, kadmíums, blýs, króms og nikkels í affallsvatni frá skiljustöð í Kröflu, Bjarnarflagslóni, Hlíðardalslæk og holu LUD-4 ásamt viðeigandi umhverfismörkum úr reglugerð um varnir gegn mengun vatns nr. 796/1999. Nokkrir óregluglegir 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 lágu styrk og óvissumörk eru því nokkuð víð samborið við mæligildið. Í sýnum 2019 má greina lítilháttar aukningu í styrk króms í Hlíðardalslæk. Styrkur kopars (mynd 51) er að jafnaði lægri en umhverfismörk II (0,003 mg/L), oft nærri umhverfismörkum I (0,0005 mg/L). Styrkur sínks (mynd 52) er vel innan við umhverfismörk I (0,005 mg/L). Á síðastliðnum árum hefur styrkur kadmíums (mynd 53) mælst um eða nærri umhverfismörkum I (0,00001 mg/L) en á árum áður mátti sjá hærri gildi þar sem styrkur þess greindist jafnvel hærri en umhverfismörk III (0,0003 mg/L) í einstökum sýnum. Ekki er ólíklegt að það stafi af minni næmni við greiningar á árum áður. Mynd 54 sýnir styrk blýs og kemur þar fram að styrkur þess er innan við umhverfismörk I (0,0002 mg/L), fyrir utan allnokkur sýni úr Bjarnarflagslóni frá því fyrir 2011 þar sem styrkur þess hefur mælst umtalsvert hærri, stundum við umhverfismörk II (0,001 mg/L) og í tveimur tilvikum yfir umhverfismörkum III (0,003 mg/L). Styrkur króms (mynd 55) hefur verið allbreytilegur, sérstaklega í Bjarnarflagslóni og Hlíðardalslæk, en mældist nærri umhverfismörkum I (0,0003 mg/L) á þessum stöðum í ár að undanskildu sýni úr Hlíðardalslæk þar sem styrkur króms mældist tæplega 0,003 mg/L. Styrkur nikkels (mynd 56) mælist að jafnaði hæstur í Hlíðardalslæk, rétt yfir umhverfismörkum I (0,0007 mg/L), og jókst styrkur þess lítillega milli áranna 2018 og 2019.

Myndir 57–62 sýna styrk sömu málma og sýndir eru á myndum 51–56 en í sýnum úr vöktunarholum í Mývatnssveit. Mynd 57 sýnir að styrkur kopars hefur á undanförunum árum verið undir umhverfismörkum II (0,003 mg/L) og í flestum holum nærri umhverfismörkum I (0,0005 mg/L) fyrir utan tvö hærri gildi fyrir 2010 úr holum LUD-2 annars vegar og LUD-4 hins vegar. Styrkur sínks (mynd 58) hefur verið vel innan við umhverfismörk I (0,005 mg/L) á undanförunum árum og er það einnig í sýnum ársins 2019 að því undanskildu að styrkur sínks

í LUD-11 mældist óvenju hár, 0,0123 mg/L. Ekki er augljós skýring á þessari hækkun í þessu eina sýni. Þó má vera að um lítilháttar „mengun“ frá járn/stáli geti verið að ræða. Styrkur járns, nikkels og annarra „tæringarmálma“ er þó ekki óvenju hár. Styrkur kadmíums (mynd 59) hefur á undanförunum árum mælst lágur, undir eða við greiningarmörk, og falla mæligildin nærri umhverfismörkum I (0,00001 mg/L). Styrkur blýs (mynd 60) mælist innan við umhverfismörk I (0,0002 mg/L) á öllum stöðum. Á mynd 61 er sýndur styrkur króms í vöktunarholunum og mælist hann ýmist nærri umhverfismörkum I eða lítið eitt hærri og alls staðar vel innan umhverfismarka II. Mynd 62 sýnir styrk nikkels í vöktunarholunum og mældist hann innan við umhverfismörk I (0,0007 mg/L) á öllum stöðum 2019.

Myndir 63–68 sýna styrk kopars, sínks, 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 og engar markverðar breytingar koma fram milli áranna 2018 og 2019.



Mynd 40. Sýnatökustaðir í Mývatnssveit. Borholur eru sýndar grænar með krossi. Volgar lindir eru rauðar, kaldar lindir bláar og manngerðir staðir eru svartir.

Tafla 13. Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum haustið 2019. Styrkur efna í mg/L.

Staðarnafn	Skiljustöð	Hlíðardalslækur	LUD-4	LUD-3	LUD-2
Staður	M-20008	V-2356	B-58504	B-58503	B-58502
Dagsetning	2019-09-19	2019-09-19	2019-09-16	2019-09-16	2019-09-16
Sýnanúmer	20190212	20190211	20190188	20190189	20190191
Hitastig (°C)	89,8	11,6	5,5	5,1	5,9
Sýrustig (pH°C) - ÍSOR	9,83 / 22,5	7,37 / 23,4	8,03 / 22,8	8,37 / 22,9	8,29 / 20,8
Sýrustig (pH°C) - Felt	9,04 / 27,2	7,89 / 11,6	7,87 / 5,5	8,59 / 5,1	8,53 / 5,9
Leiðni við 25°C (µS/cm)	1050	408	289	178	195
Karbonsat (CO ₂)	68,4	57,2	53,4	64,1	70,3
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	0,86	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Bór (B)	1,27	0,142	0,070	0,005	0,016
Kísill (SiO ₂)	615	84,7	52,6	21,8	23,3
Natríum (Na)	254	40,2	39,4	16,7	19,5
Kalíum (K)	40,2	7,42	2,49	1,94	2,11
Magnesíum (Mg)	0,01	9,66	8,45	7,57	7,94
Kalsíum (Ca)	2,31	42,2	13,3	11,8	12,9
Flúoríð (F)	1,51	0,21	0,23	0,18	0,18
Klóríð (Cl)	123	13,8	9,24	4,94	5,42
Brómíð (Br)	0,36	0,04	0,02	0,02	0,02
Súlfat (SO ₄)	172	145	75,7	12,9	16,2
Ál (Al)	1,52	0,0634	0,217	0,00665	0,0133
Arsen (As)	0,0310	0,00559	0,00363	0,000188	0,000239
Baríum (Ba)	0,00301	0,00173	0,000550	0,000286	0,000319
Kadmíum (Cd)	0,000005	0,000002	0,000004	<0,000002	<0,000002
Kóbalt (Co)	0,000006	0,000196	0,000007	<0,000005	<0,000005
Króm (Cr)	0,000027	0,00297	0,000334	0,000986	0,00129
Kopar (Cu)	<0,0001	0,000371	0,00121	0,000378	0,00169
Járn (Fe)	0,00676	0,0280	0,0253	0,00619	0,00142
Kvikasilfur (Hg)	0,000003	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Lítíum (Li)	0,27	0,03	0,02	<0,01	<0,01
Mangan (Mn)	0,00162	0,0347	0,00140	0,000459	<0,00003
Mólybden (Mo)	0,00771	0,00379	0,00147	0,000630	0,000653
Nikkel (Ni)	<0,00005	0,00234	0,000080	0,000118	0,000063
Blý (Pb)	0,000016	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001
Strontíum (Sr)	0,0140	0,0471	0,0178	0,0136	0,0158
Vanadíum (V)	0,00203	0,00732	0,0139	0,0268	0,0267
Sink (Zn)	0,000732	0,00116	0,00132	0,000328	0,00105
Uppleyst steinefni (UE)	1465	411	243	123	133
δD (‰ SMOW)	-82,7	-69,3	-80,8	-92,0	-92,0
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-9,45	8,70	-10,71	-12,71	-12,64

Tafla 13. (Frh.) Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum haustið 2019. Styrkur efna í mg/L.

Staðarnafn	LUD-06	LUD-11	Bjarnarflagslón	Bjarg	Helgavogur
Staður	B-58506	B-58521	M-20004	H-10080	H-10082
Dagsetning	2019-09-19	2019-09-18	2019-09-18	2019-09-16	2019-09-19
Sýnanúmer	20190208	20190204	20190206	20190190	20190210
Hitastig (°C)	35,5	33,8	26,2	19,3	23,5
Sýrustig (pH/°C) - ÍSOR	8,25 / 23,3	7,66 / 22,8	6,36 / 23,3	7,95 / 16,6	8,15 / 23,2
Sýrustig (pH/°C) - Felt	8,18 / 35,5	7,46 / 33,8	6,98 / 26,2	7,95 / 19,3	8,24 / 23,5
Leiðni við 25°C (µS/cm)	325	438	619	265	333
Karbonsat (CO ₂)	109	158	11,8	71,6	105
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	<0,03	<0,03	0,05	<0,03	<0,03
Bór (B)	0,0569	0,0420	1,84	0,0350	0,0785
Kísill (SiO ₂)	60,0	72,4	510	57,8	70,2
Natríum (Na)	49,9	61,3	138	40,9	50,0
Kalíum (K)	6,08	6,39	21,3	3,79	4,95
Magnesium (Mg)	6,88	8,83	0,73	3,82	4,78
Kalsíum (Ca)	19,5	40,5	2,52	15,2	24,7
Flúoríð (F)	0,24	0,19	0,64	0,24	0,25
Klóríð (Cl)	4,99	5,25	44,1	8,87	7,27
Brómíð (Br)	0,01	0,02	0,13	0,02	0,02
Súlfat (SO ₄)	56,7	92,6	222	42,5	62,3
Ál (Al)	0,00581	0,00302	1,36	0,00742	0,00496
Arsen (As)	0,000052	0,000132	0,185	0,000237	0,000177
Baríum (Ba)	0,00311	0,00989	0,000757	0,000663	0,00156
Kadmíum (Cd)	<0,000002	0,000003	<0,000002	0,000003	<0,000002
Kóbalt (Co)	<0,000005	<0,000005	0,000015	0,000016	<0,000005
Króm (Cr)	0,000097	0,000740	0,000027	0,000579	0,000677
Kopar (Cu)	0,000136	0,000260	0,000598	0,00143	0,000765
Járn (Fe)	0,0177	0,0170	0,228	0,00288	0,00056
Kvikasilfur (Hg)	<0,000002	<0,000002	0,000004	<0,000002	<0,000002
Lítíum (Li)	0,01	0,01	0,12	<0,01	0,01
Mangan (Mn)	0,00284	0,00509	0,00652	0,000184	0,000054
Mólybden (Mo)	0,000818	0,000880	0,000419	0,00107	0,000919
Nikkel (Ni)	0,000134	0,000307	<0,00005	<0,00005	<0,00005
Blý (Pb)	0,000010	0,000017	0,000027	0,000010	<0,00001
Strontíum (Sr)	0,0525	0,0711	0,0117	0,0246	0,0347
Vanadíum (V)	0,0106	0,0227	0,00113	0,0232	0,0276
Sink (Zn)	0,000235	0,0123	0,00164	0,000699	0,000433
Uppleyst steinefni (UE)	282	389	1123	230	304
δD (‰ SMOW)	-92,5	-86,8	-83,9	-91,1	-88,9
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-12,32	-12,21	-7,18	-12,57	-12,27

Tafla 13. (Frh.) Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum haustið 2019. Styrkur efna í mg/L.

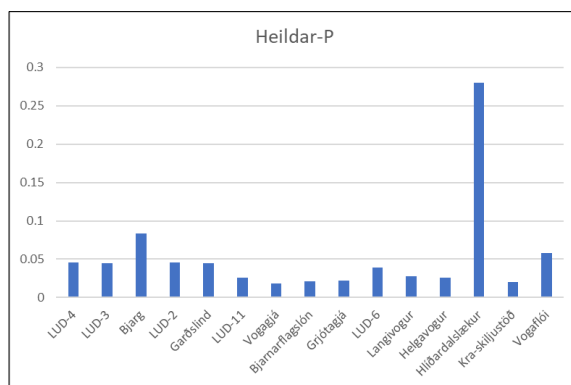
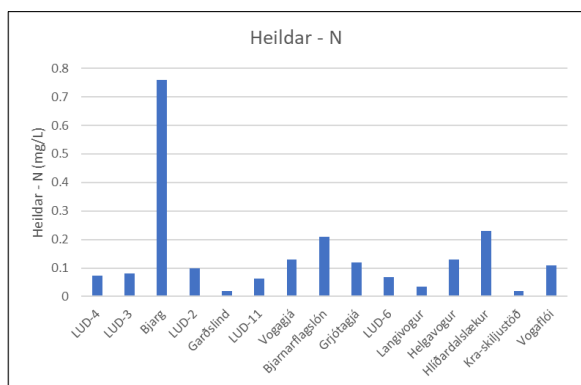
Staðarnafn	Grjótagjá	Vogagjá	Langivogur	Vogaflói	Garðslind
Staður	H-10085	H-10087	H-10088	K-558	K-556
Dagsetning	2019-09-19	2019-09-18	2019-09-19	2019-09-19	2019-09-16
Sýnanúmer	20190207	20190205	20190209	20190213	20190192
Hitastig (°C)	45,4	39,5	21,1	6,6	6,3
Sýrustig (pH/°C) - ÍSOR	8,31 / 23,1	8,46 / 23,1	8,38 / 23,3	8,55 / 23,0	8,70 / 20,5
Sýrustig (pH/°C) - Felt	8,12 / 45,4	8,29 / 39,5	8,48 / 21,1	8,10 / 6,6	9,02 / 6,3
Leiðni við 25°C (µS/cm)	390	410	361	193	141
Karbónat (CO ₂)	93,7	79,7	80,9	59,2	51,4
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	0,27	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Bór (B)	0,283	0,280	0,232	0,0414	<0,005
Kísill (SiO ₂)	147	140	118	24,4	18,9
Natríum (Na)	77,8	83,0	71,5	24,1	18,1
Kalíum (K)	7,85	7,14	6,36	1,97	1,40
Magnesíum (Mg)	2,32	2,08	3,07	6,05	4,76
Kalsíum (Ca)	13,7	15,0	14,8	12,5	7,09
Flúoríð (F)	0,37	0,34	0,31	0,21	0,19
Klóríð (Cl)	16,7	15,7	13,3	4,35	1,88
Brómíð (Br)	0,05	0,04	0,04	0,01	0,01
Súlfat (SO ₄)	80,6	108	91,2	21,6	7,30
Ál (Al)	0,0260	0,00809	0,00257	0,00676	0,0109
Arsen (As)	<0,00005	<0,00005	0,000115	0,000188	0,000126
Baríum (Ba)	0,00226	0,00172	0,00154	0,000361	0,000198
Kadmíum (Cd)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Kóbalt (Co)	0,000008	<0,000005	<0,000005	0,000005	<0,000005
Krómi (Cr)	0,000030	0,000174	0,000272	0,00146	0,00108
Kopar (Cu)	0,000327	0,000283	0,000348	0,00112	0,000243
Járn (Fe)	0,00261	0,000467	0,000703	0,00185	<0,0004
Kvikasilfur (Hg)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Lítíum (Li)	0,01	0,01	0,01	<0,01	<0,01
Mangan (Mn)	0,0177	0,000033	0,000067	0,000116	<0,00003
Mólybden (Mo)	0,000210	0,000255	0,000347	0,000791	0,000723
Nikkel (Ni)	<0,00005	<0,00005	<0,00005	<0,00005	<0,00005
Blý (Pb)	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001
Strontíum (Sr)	0,0195	0,0195	0,0207	0,0142	0,00902
Vanadíum (V)	0,000252	0,00576	0,0117	0,0418	0,0364
Sink (Zn)	0,000577	0,000316	<0,0002	0,000234	<0,0002
Uppleyst steinefni (UE)	413	448	389	136	87
δD (‰ SMOW)	-91,3	-91,6	-91,0	-91,8	-94,2
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-11,60	-11,72	-11,64	-12,59	-13,02

5.2 Næringarefni í sýnum úr Mývatnssveit

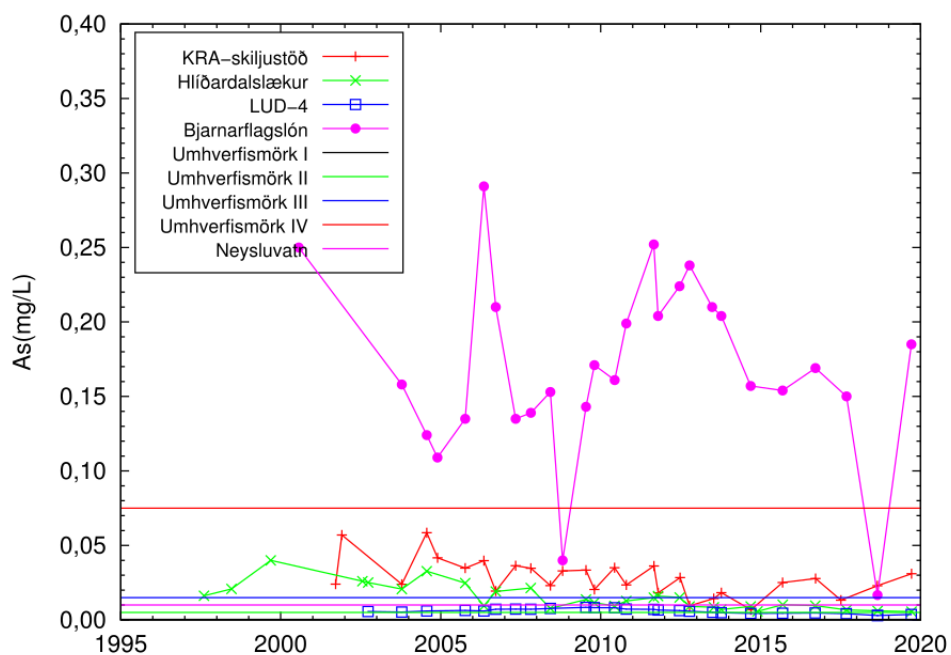
Að beiðni Landsvirkjunar var sérstökum sýnum safnað samhliða sýnatöku haustið 2019 á öllum sýnatökustöðum í Mývatnssveit til greininga á næringarefnum (köfnunarefni (N) og fosfór (P)). Niðurstöður eru sýndar í töflu 14. Niðurstöður sams konar sýnatöku og efnagreininga á næringarefnum haustið 2017 sýndu að styrkur þeirra mældist hæstur í lind neðan við Bjarg (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2017). Niðurstöður nú sýna einnig að styrkur heildar-N er hæstur við Bjarg en styrkur heildar-P er hæstur í Hlíðardalslæk eins og vel kemur fram á mynd 41.

Tafla 14. Niðurstöður efnagreininga á næringarefnum í sýnum úr Mývatnssveit (mg/L).

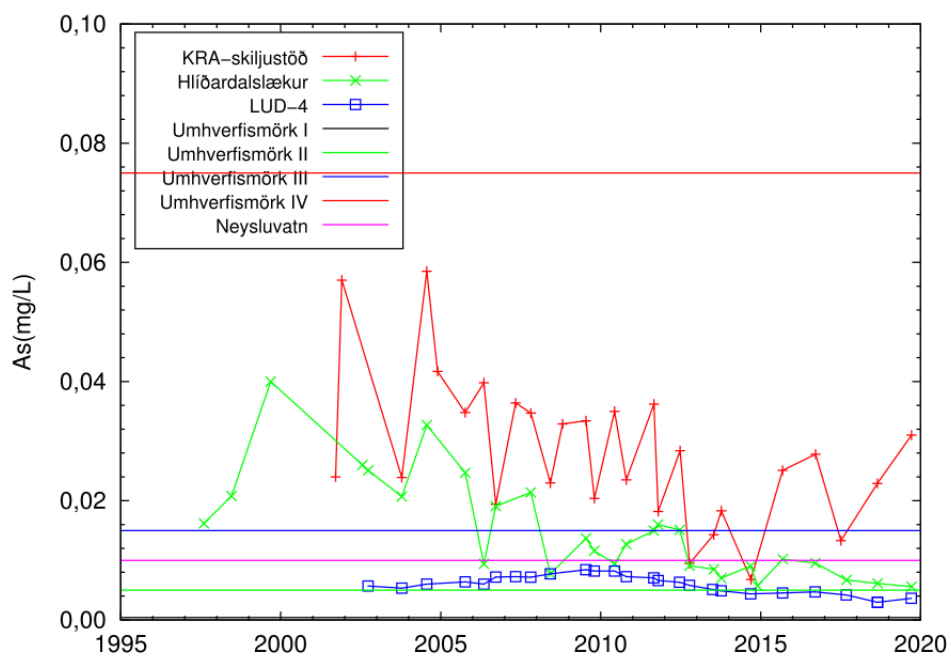
Staður	Sýni	Nítrat-N (NO ₃ -N)	Ammóníak-N (NH ₃ -N)	Heildar -N	Fosfat-P (PO ₄ -P)	Heildar-P	Nítrít-N (NO ₂ -N)
LUD-4	20190188	0,083	<0,003	0,072	0,041	0,046	<0,0005
LUD-3	20190189	0,042	<0,003	0,081	0,040	0,045	<0,0005
Bjarg	20190190	0,74	0,004	0,76	0,077	0,083	0,0006
LUD-2	20190191	0,059	<0,003	0,099	0,038	0,046	<0,0005
Garðslind	20190192	0,014	0,004	<0,020	0,044	0,045	0,0005
LUD-11	20190204	0,024	<0,003	0,063	0,008	0,026	<0,0005
Vogagjá	20190205	0,040	<0,003	0,13	0,014	0,018	<0,0005
Bjarnarflagslón	20190206	0,007	<0,003	0,21	0,020	0,021	<0,0005
Grjótagjá	20190207	0,005	0,050	0,12	0,014	0,022	0,0006
LUD-6	20190208	0,009	<0,003	0,068	0,016	0,039	<0,0005
Langivogur	20190209	0,048	<0,003	0,034	0,019	0,028	0,0006
Helgavogur	20190210	0,17	0,004	0,13	0,014	0,026	0,0005
Hlíðardalslækur	20190211	0,005	<0,003	0,23	0,020	0,28	<0,0005
Krafla skiljustöð	20190212	0,008	0,007	<0,02	0,024	0,020	<0,0005
Vogaflói	20190213	0,067	<0,003	0,11	0,043	0,058	0,00083



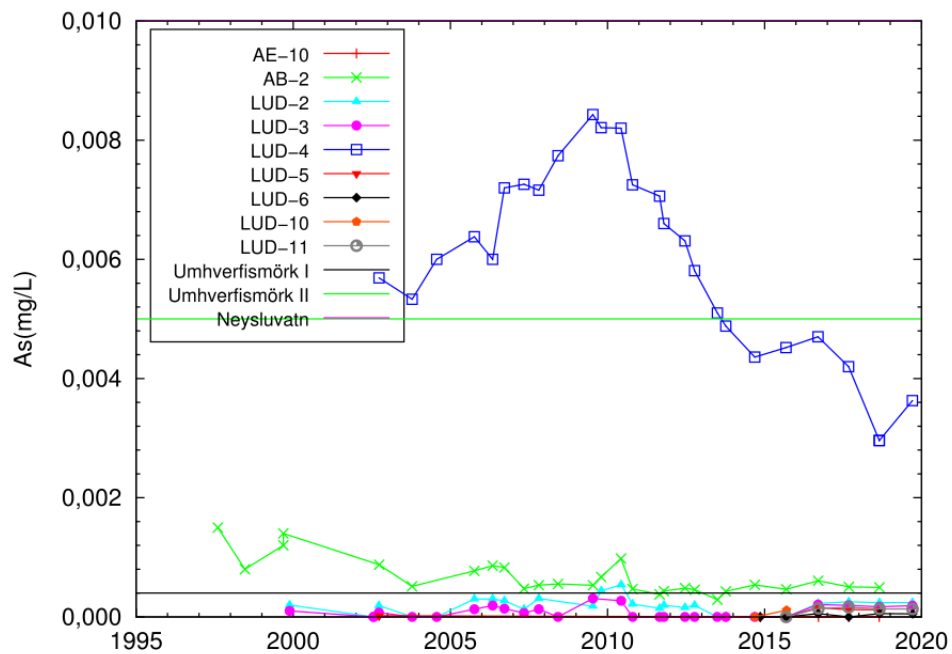
Mynd 41. Styrkur köfnunarefnis og fosfats í sýnum úr Mývatnssveit.



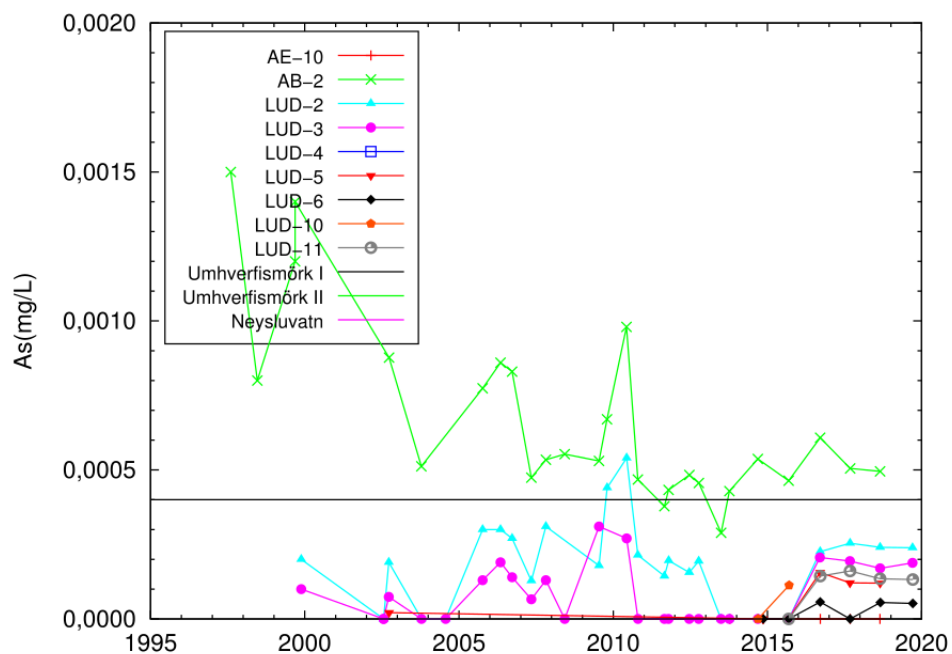
Mynd 42. Styrkur arsens í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt umhverfismörkum I (0,0004 mg/L), II (0,005 mg/L), III (0,015 mg/L) og IV (0,075 mg/L) og mörkum fyrir neysluvatn (0,01 mg/L).



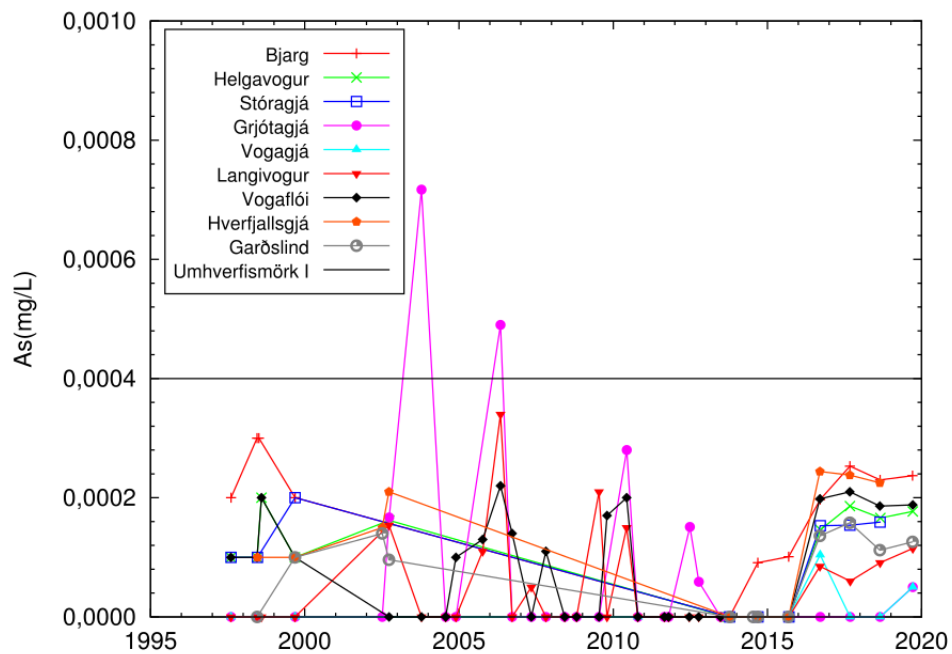
Mynd 43. Styrkur arsens í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk og LUD-4 ásamt umhverfismörkum I, II, III og IV og hámarksgildi fyrir neysluvatn. Sömu gögn og á mynd 2 en niðurstöðum fyrir Bjarnarflaglón sleppt til betri aðgreiningar þessara þriggja staða.



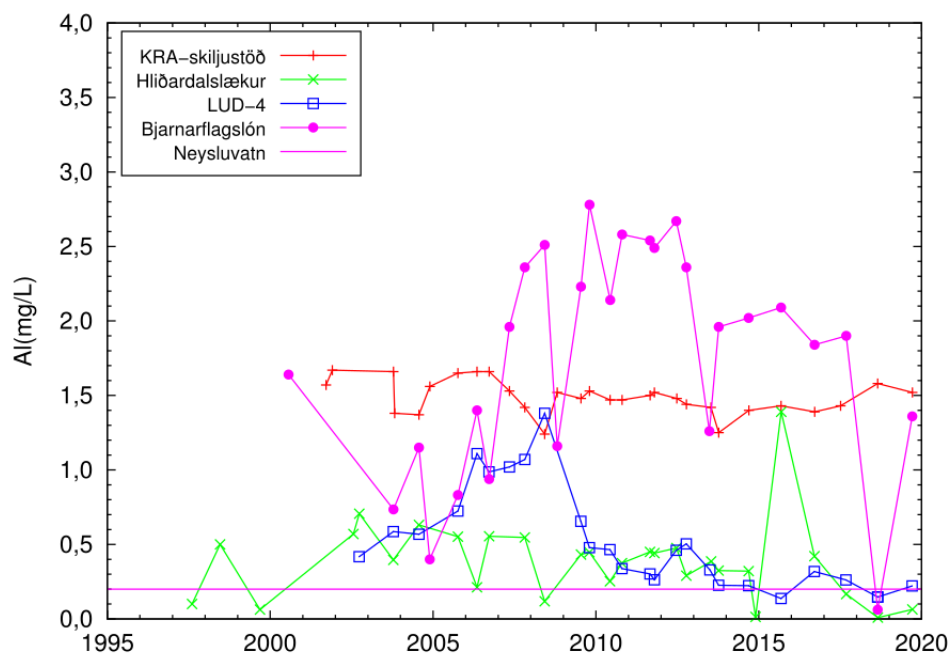
Mynd 44. Styrkur arsens í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I (0,0004 mg/L) og II (0,005 mg/L). Viðmiðunarmörk fyrir styrk arsens í neysluvatni (0,01 mg/L) eru efst á myndinni.



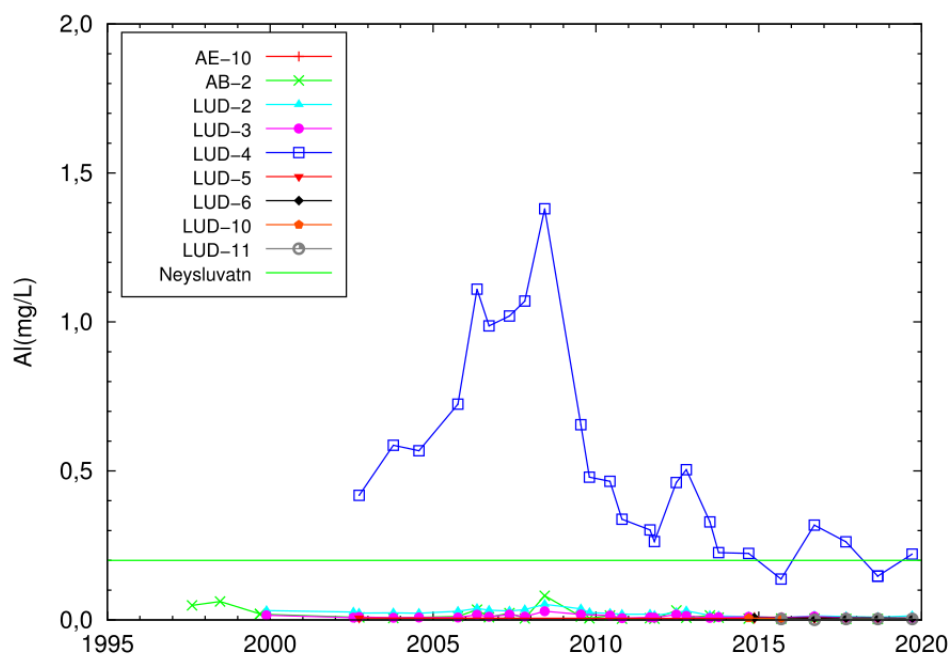
Mynd 45. Styrkur arsens í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I. Niðurstöðum fyrir LUD-4 hefur verið sleppt til betri aðgreiningar á niðurstöðum.



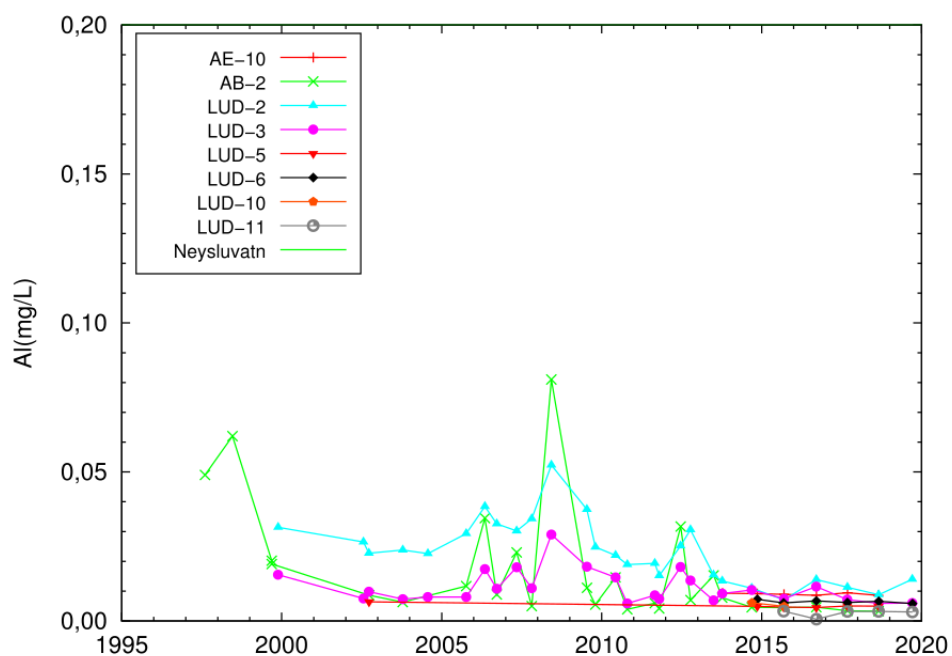
Mynd 46. Styrkur arsens í lindum við Mývatn ásamt umhverfismörkum I (0,0004 mg/L).



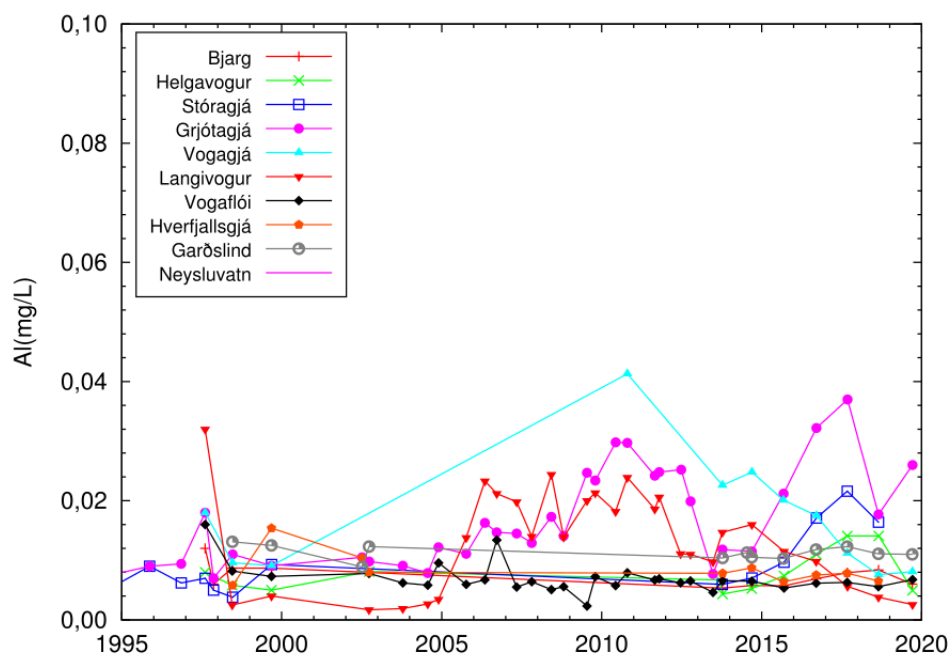
Mynd 47. Styrkur áls í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt viðmiðunarmörkum fyrir neysluvatn (0,2 mg/L).



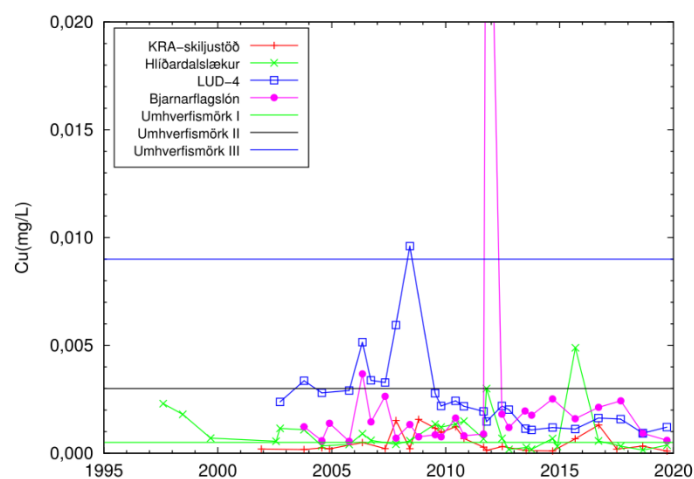
Mynd 48. Styrkur áls í vatni úr borholum ásamt viðmiðunarmörkum fyrir neysluvatn (0,2 mg/L).



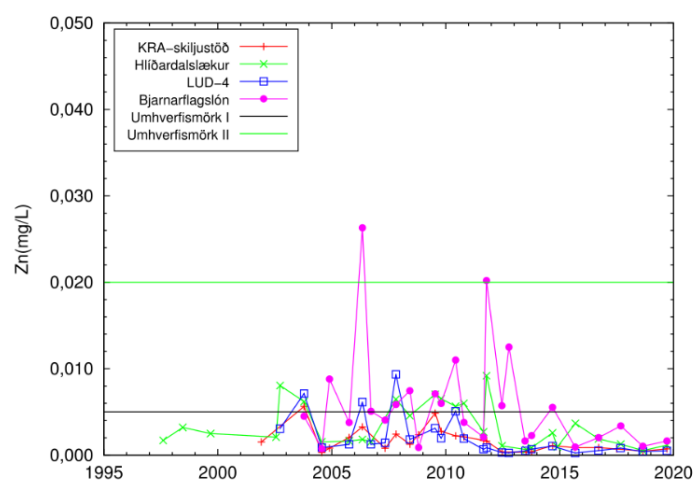
Mynd 49. Styrkur áls í vatni úr borholum ásamt hámarksgildi fyrir neysluvatn (0,2 mg/L; efst á myndinni). Niðurstöðum fyrir LUD-4 hefur verið sleppt til betri aðgreiningar á niðurstöðum.



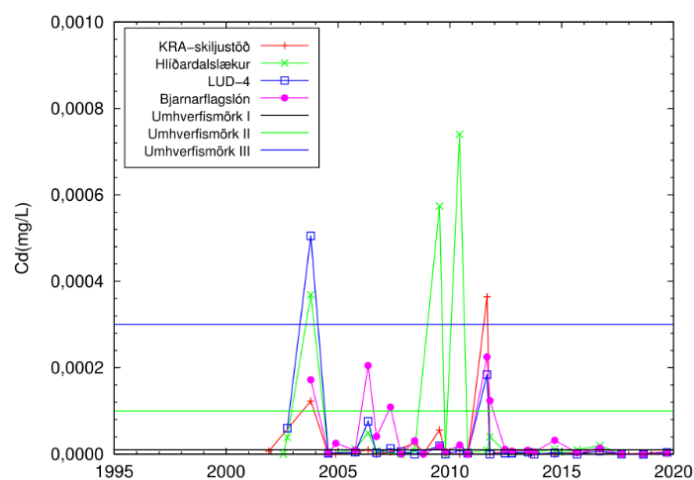
Mynd 50. Styrkur áls í vatni í lindum við Mývatn. Neysluvatnsmörk falla utan kvarða myndarinnar.



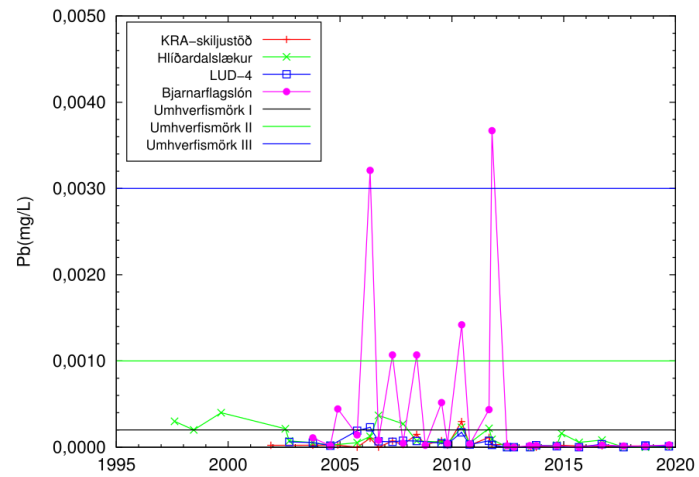
Mynd 51. Styrkur kopars í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflaglóni ásamt umhverfismörkum I (0,0005 mg/L), II (0,003 mg/L) og III (0,009 mg/L).



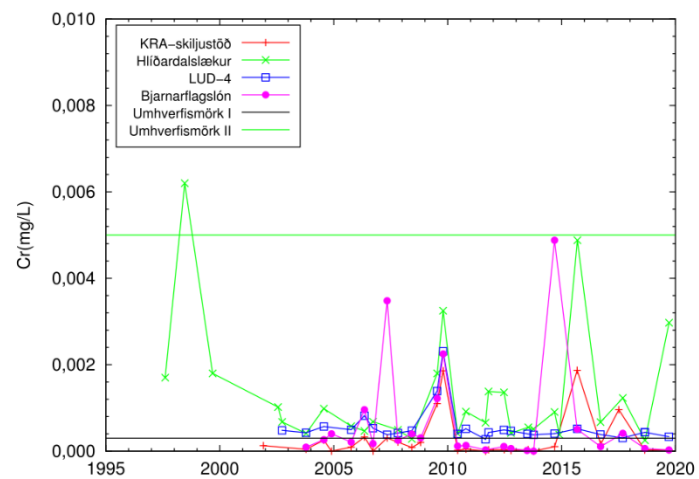
Mynd 52. Styrkur síns í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflaglóni ásamt umhverfismörkum I (0,005 mg/L) og II (0,02 mg/L).



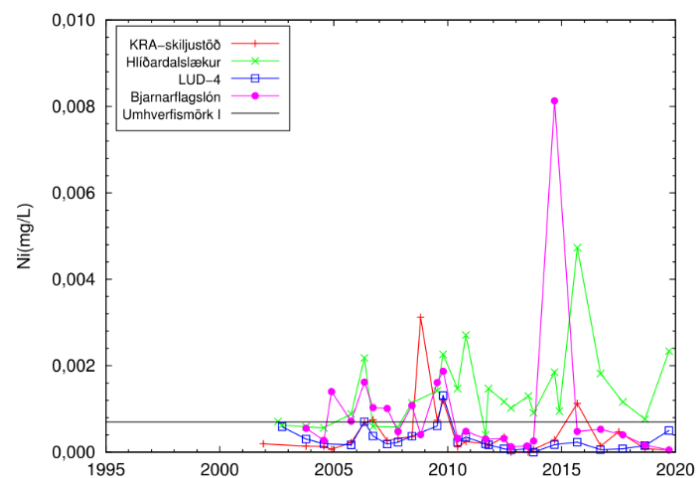
Mynd 53. Styrkur kadmíums í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflaglóni ásamt umhverfismörkum I (0,00001 mg/L), II (0,0001 mg/L) og III (0,0003 mg/L).



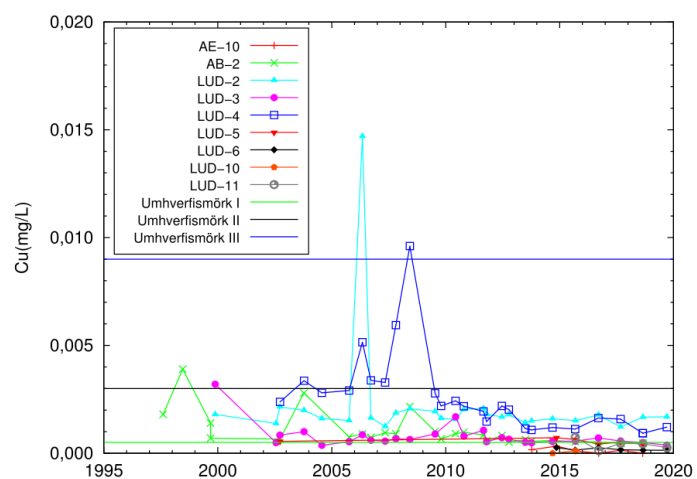
Mynd 54. Styrkur blýs í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt umhverfismörkum I (0,0002 mg/L), II (0,001 mg/L) og III (0,003 mg/L).



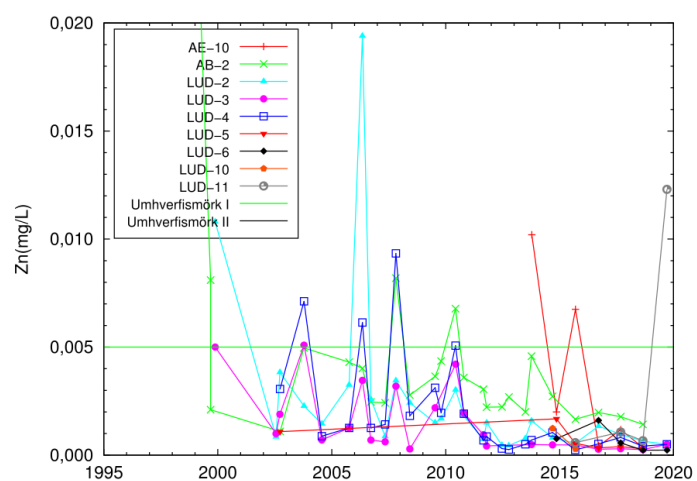
Mynd 55. Styrkur króms í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt umhverfismörkum I (0,0003 mg/L) og II (0,005 mg/L).



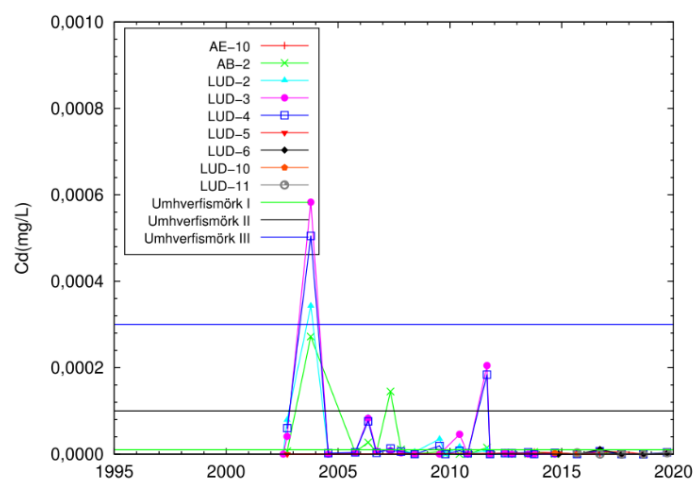
Mynd 56. Styrkur nikkels í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt umhverfismörkum I (0,0007 mg/L).



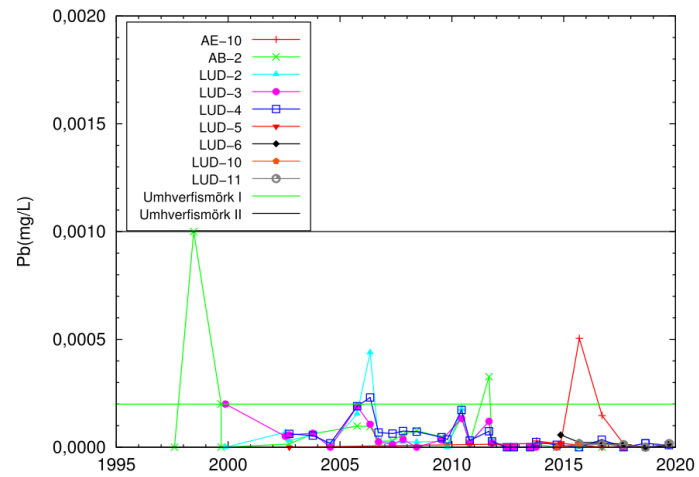
Mynd 57. Styrkur kopars í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I (0,0005 mg/L), II (0,003 mg/L) og III (0,009 mg/L).



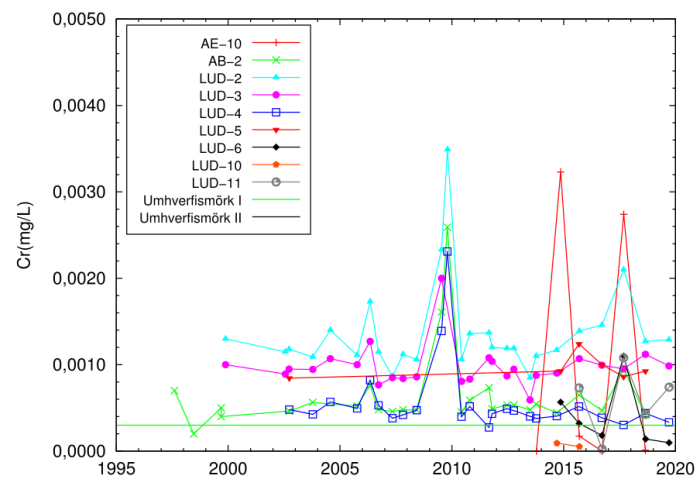
Mynd 58. Styrkur síns í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I (0,005 mg/L) og II (0,02 mg/L) efst á myndinni.



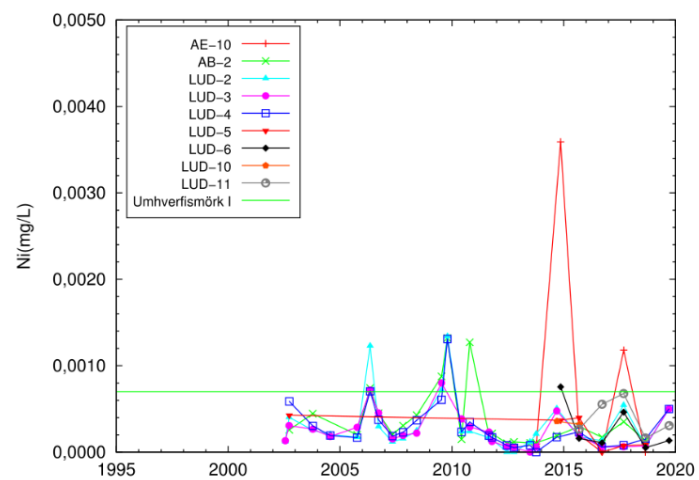
Mynd 59. Styrkur kadmíums í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I (0,00001 mg/L), II (0,0001 mg/L) og III (0,0003 mg/L).



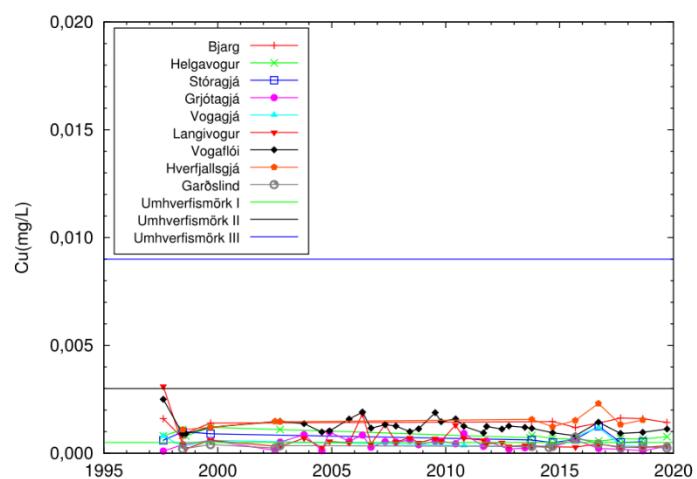
Mynd 60. Styrkur blýs í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I (0,0002 mg/L) og II (0,001 mg/L).



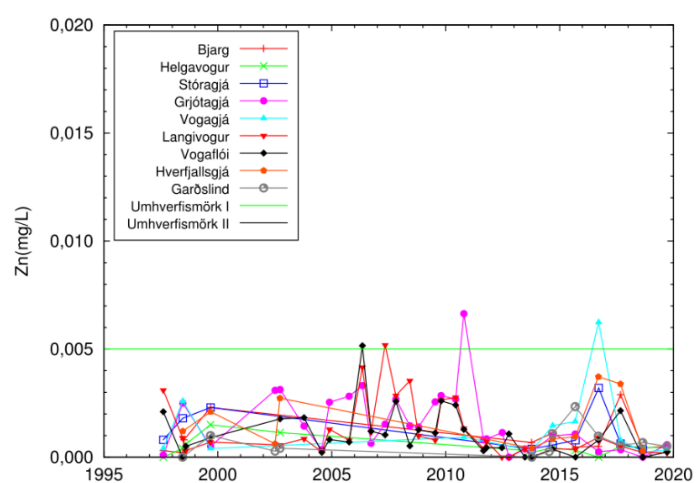
Mynd 61. Styrkur króms í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I (0,0003 mg/L) og II (0,005 mg/L) efst á myndinni.



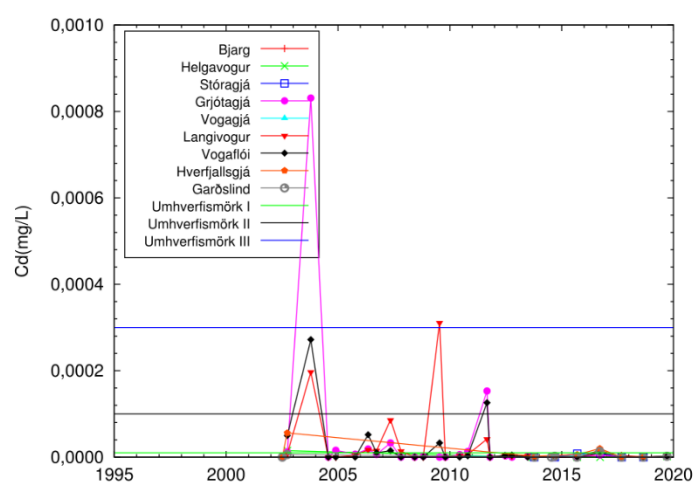
Mynd 62. Styrkur nikkels í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I (0,0007 mg/L).



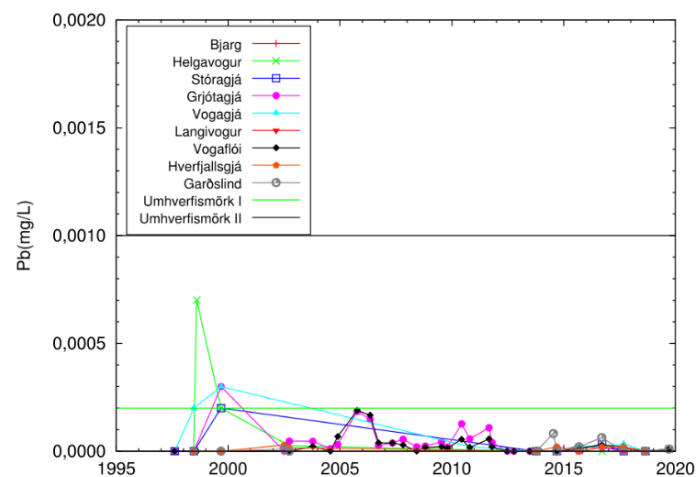
Mynd 63. Styrkur kopars í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum I (0,0005 mg/L), II (0,003 mg/L) og III (0,009 mg/L).



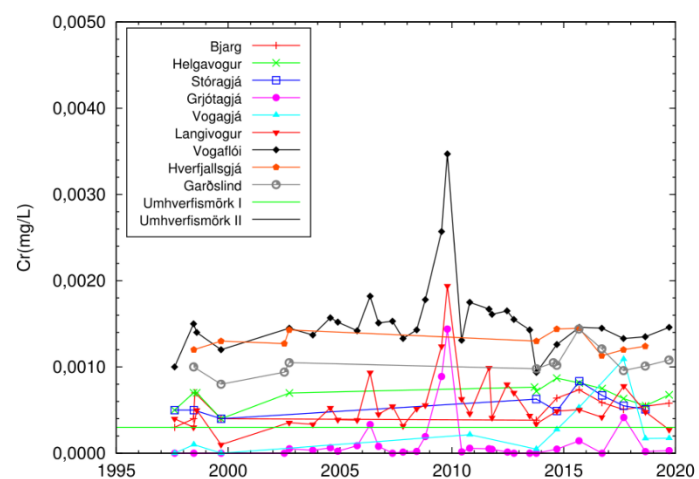
Mynd 64. Styrkur síns í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum I (0,005 mg/L) og II (0,02 mg/L) efst á myndinni.



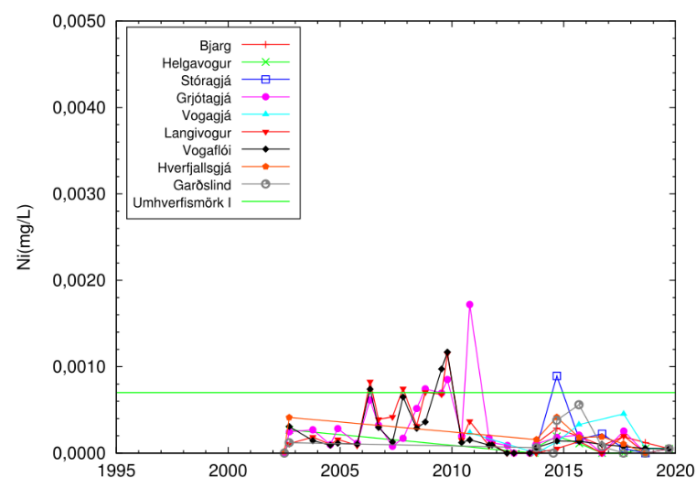
Mynd 65. Styrkur kadmíums í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum I (0,00001 mg/L), II (0,0001 mg/L) og III (0,0003 mg/L).



Mynd 66. Styrkur blýs í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum I (0,0002 mg/L) og II (0,001 mg/L).



Mynd 67. Styrkur króms í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum I (0,0003 mg/L) og II (0,005 mg/L) efst á myndinni.



Mynd 68. Styrkur nikkels í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum I (0,0007 mg/L).

5.3 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 2019 fór sýnataka á Þeistareykjum og Kelduhverfi fram í septembermánuði, líkt og í Mývatnssveit. Í Kelduhverfi er sýnum safnað úr köldum og volgum lindum og á Þeistareykjum hafa sérstakar holur verið boraðar fyrir grunnvatnseftirlit og í þeim eru djúpdælur. Einnig er sýnum safnað úr vatnsbóli Þeistareykja vestan undir Ketilfjalli. Að þessu sinni voru að ósk Landsvirkjunar ekki tekin sýni úr vatnsbóli sæluhúss á Þeistareykjum og lind sunnan við Fjöll í Kelduhverfi. Yfirlit um sýnatökustaðina er gefið í töflu 15 og þeir eru einnig sýndir á mynd 69.

Tafla 15. Sýnatökustaðir á Þeistareykjum og í Kelduhverfi 2019.

<i>Staður</i>	<i>Staðarnr.</i>	<i>Sýni nr.</i>	<i>Dagsetning</i>	<i>Hitastig (°C)</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>
Þeistareykir- vatnsból	M-20409	20190196	17.9.2019	18,3	594285	599848
ÞR-8	B-60368	20190195	17.9.2019	2,7	591519	608366
ÞR-9	B-60369	20190193	17.9.2019	8,1	590436	602733
ÞR-15	B-60376	20190194	17.9.2019	16,4	595016	608951
ÞR-16	B-60377	20190197	17.9.2019	5,4	589986	598150
Krossdalur	K-2745	20190200	18.9.2019	4,3	602765	622250
Rífós - Tangabrunnur	K-2743	20190201	18.9.2019	10,7	594606	624481
Lón	K-2744	20190202	18.9.2019	4,9	593990	623909
Fjöll - vatnsból	K-568	20190203	18.9.2019	3,1	592404	622118

Djúpdælur eru í vöktunarholum á Þeistareykjum og í töflu 16 er yfirlit um þær og hve miklu var dælt úr hverri holu við sýnatöku haustið 2019. Hóla ÞR-9 var í stöðugri dælingu á þeim tíma sem sýni var tekið líkt og verið hefur undanfarin ár.

Tafla 16. Yfirlit um dælt magn við sýnatöku 2019 úr vöktunarholum á Þeistareykjum.

<i>Hóla</i>	<i>Staðarnr.</i>	<i>Sýni nr.</i>	<i>Dagsetning</i>	<i>Hitastig (°C)</i>	<i>Magn (L)</i>
ÞR-8	B-60368	20190195	17.9.2019	2,7	3710
ÞR-9	B-60369	20190193	17.9.2019	8,1	Í stöðugri dælingu
ÞR-15	B-60376	20190194	17.9.2019	16,4	2430
ÞR-16 ¹⁾	B-60377	20190197	17.9.2019	5,4	~300

¹⁾: Ólag á dælu og dæling mjög breytileg.

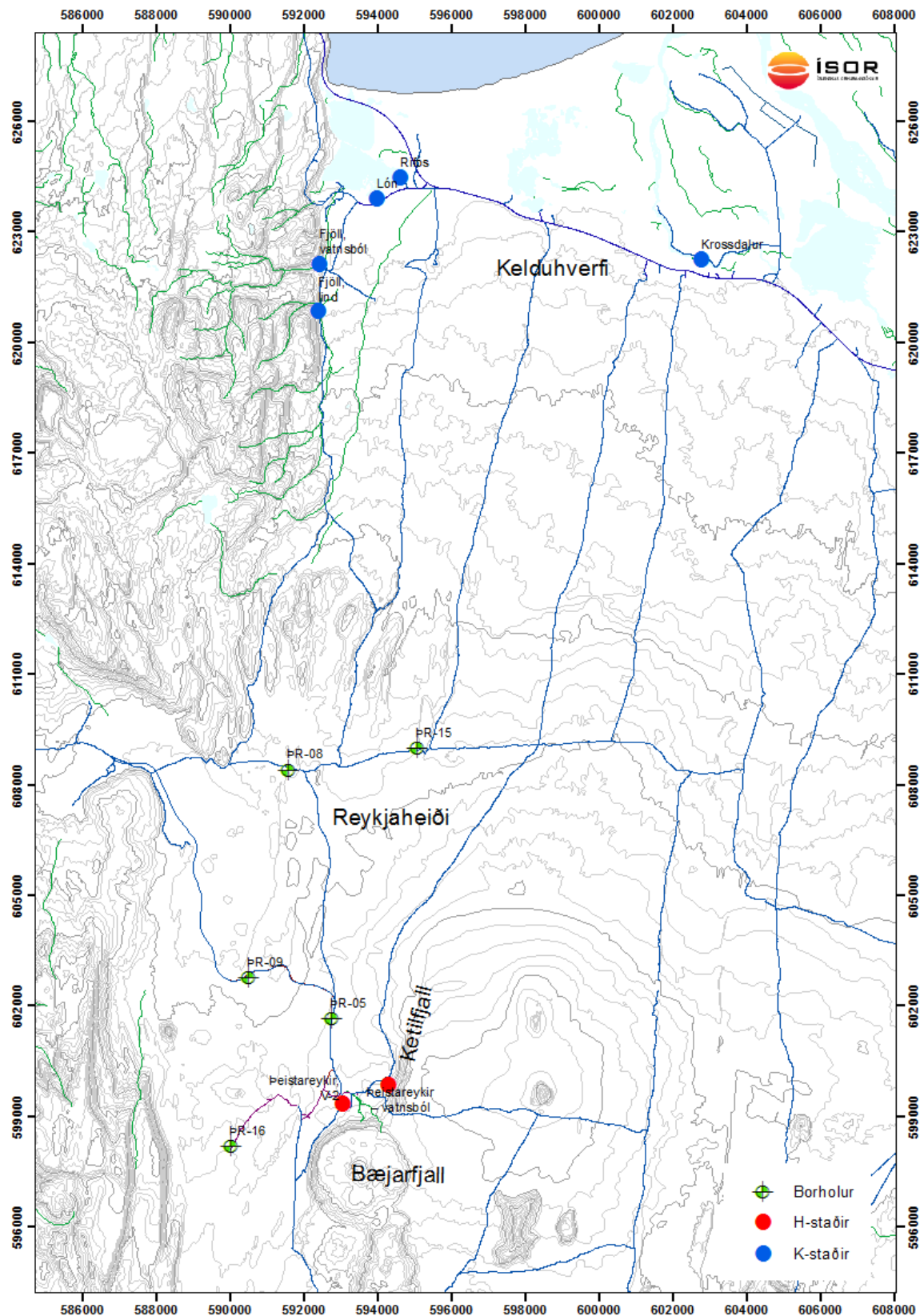
Niðurstöður efnagreininga úr Kelduhverfi og Þeistareykjum eru sýndar í töflu 17. Á myndum 70 og 71 eru sýndar niðurstöður fyrir styrk arsens og áls fyrir vöktunarstaði í Kelduhverfi og á myndum 72–77 eru aftur á móti sýndar niðurstöður fyrir mælingar á styrk kopars, sínks, kadmíums, blýs, króms og nikkels fyrir þessa sömu vöktunarstaði. Niðurstöður flestra mælinga á vöktunarstöðum í Kelduhverfi fyrir 2010 eru fengnar frá Háskólanum á Akureyri (Hrefna Kristmannsdóttir, 2010). Uppgefin umhverfismörk eru skráð í töflu 12 og sýnd á myndunum.

Niðurstöður mælinga á arseni og áli í Kelduhverfi (myndir 70 og 71) sýna engar marktækar breytingar milli áranna 2018 og 2019. Fyrir arsen eru allar niðurstöður vel innan umhverfismarkna I (0,0004 mg/L) og fyrir ál eru niðurstöður langt undir hámarksgildi fyrir neysluvatn (0,2 mg/L).

Niðurstöður greininga á styrk kopars, sínks, kadmíums, blýs, króms og nikkels eru sýndar á myndum 72–77. Fyrir kopar (mynd 72) falla niðurstöður efnagreininga undanfarin ár við eða innan við umhverfismörk I (0,0005 mg/L) og sama er að segja um sínk, kadmíum og blý (myndir 73–75). Styrkur kadmíums er t.d. alltaf innan greiningarmarkna (0,000002 mg/L). Myndir 76 og 77 sýna að styrkur króms og nikkels í lindum í Kelduhverfi mælist nærri umhverfismörkum I (0,0003 mg/L) fyrir króm og ávallt innan umhverfismarkna I (0,0007 mg/L) fyrir nikkel. Haustið 2019 eru þó á þessu þau frávik að styrkur þessara snefilmálma mælist óvenjulega hár í sýninu frá Lóni og sama á við um fleiri málma, s.s. járn, mangan og mólýbden. Hvað veldur er ekki vitað en gæti verið „mengun“ við sýnatöku eða efnagreiningu. Styrkur þessara efna er þó lágur en rétt er að fylgjast með honum að ári.

Myndir 78 og 79 sýna styrk arsens og áls í sýnum frá Þeistareykjum. Styrkur arsens mælist langt innan umhverfismarkna I (0,0004 mg/L) og breytist ekkert milli ára. Sama má í raun segja um styrk áls, hann mælist langt innan viðmiðunarmarkna fyrir neysluvatn (0,2 mg/L) og breytist ekkert milli ára. Styrkur kopars (mynd 80) mælist um og rétt yfir umhverfismörkum I (0,0005 mg/L) og breytist ekki milli ára. Sama máli gegnir um sínk (mynd 81). Styrkur kadmíums (mynd 82) mælist að venju innan umhverfismarkna I (0,00001 mg/L) og greiningarmarkna og hefur ekki breyst milli ára. Sama máli gegnir um styrk blýs (mynd 83) þar sem styrkur er á öllum stöðum innan umhverfismarkna I (0,0002 mg/L). Styrkur króms (mynd 84) mælist við eða rétt ofan umhverfismarkna I. Styrkur nikkels (mynd 85) mælist alls staðar innan umhverfismarkna I líkt og verið hefur fyrir utan frávik sem fram hafa komið í sýnum í vatnsbóli Þeistareykjaskála. Þar var ekki tekið sýni haustið 2019.

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, holu ÞR-15 og við Rifós. Á öllum þessum stöðum er hitastig vatns einnig vel yfir grunnvatnshita á svæðinu.



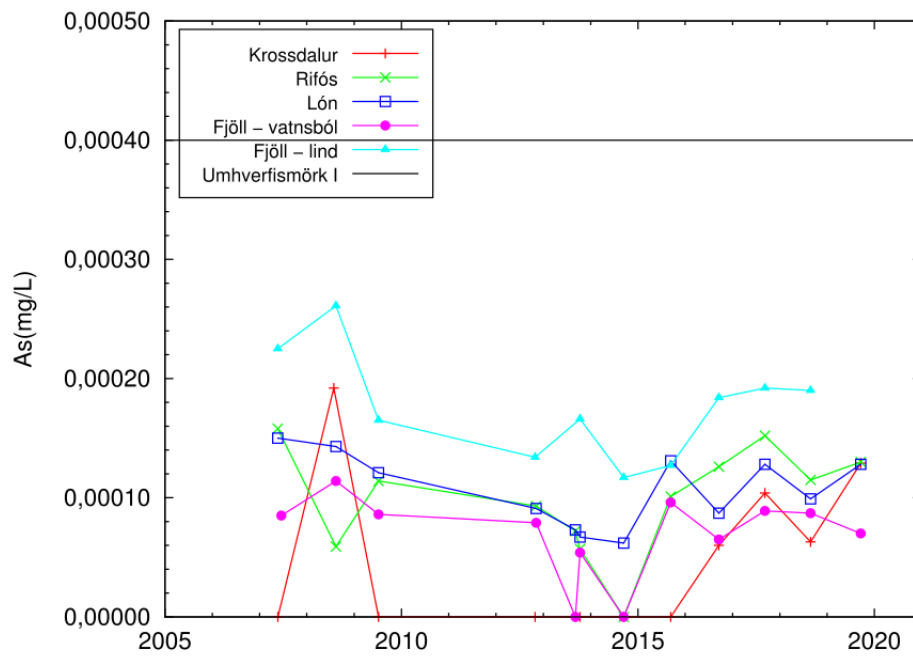
Mynd 69. Sýnatökustaðir í Kelduhverfi og á Peistareykjum. Borholur eru sýndar grænar með krossi. Volgar lindir eru rauðar og kaldar lindir bláar.

Tafla 17. Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum á Þeistareykjum 2019. Styrkur efna í mg/L.

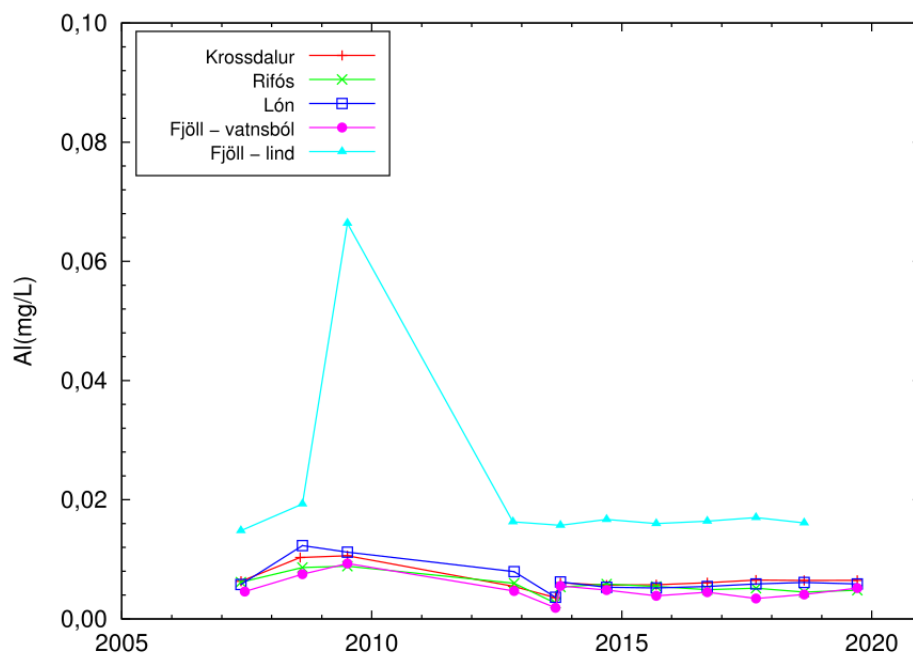
Staðarnafn	Vatnsból	ÞR-8	ÞR-9	ÞR-15	ÞR-16
Staður	M-20409	B-60368	B-60369	B-60376	B-60377
Dagsetning	2019-09-17	2019-09-17	2019-09-17	2019-09-17	2019-09-17
Sýnanúmer	20190196	20190195	20190193	20190194	20190197
Hitastig (°C)	18,3	2,7	8,1	16,4	5,4
Sýrustig (pH/°C) - ÍSOR	6,76 / 21,1	8,50 / 22,0	8,09 / 20,9	7,96 / 21,7	8,39 / 25,7
Sýrustig (pH/°C) - Felt	6,42 / 18,3	8,82 / 2,7	8,32 / 8,1	8,00 / 16,4	8,59 / 5,4
Leiðni við 25°C (µS/cm)	216	68,0	114	162	91,9
Karbonsat (CO ₂)	136	14,6	31,2	50,9	29,8
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Bór (B)	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005
Kísill (SiO ₂)	52,7	16,5	24,3	38,1	21,4
Natríum (Na)	17,0	7,53	10,8	15,9	9,60
Kalíum (K)	2,11	0,49	1,07	1,35	1,21
Magnesíum (Mg)	7,51	1,86	3,81	4,58	3,65
Kalsíum (Ca)	22,6	3,54	7,31	12,8	4,25
Flúoríð (F)	0,04	0,04	0,09	0,07	0,09
Klóríð (Cl)	4,92	6,22	5,51	7,64	5,00
Brómíð (Br)	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Súlfat (SO ₄)	10,3	1,52	9,38	15,6	1,71
Ál (Al)	0,000544	0,0108	0,00337	0,00355	0,00663
Arsen (As)	0,000081	0,000118	0,000152	0,000061	0,000096
Baríum (Ba)	0,000899	0,000079	0,000087	0,000254	0,000345
Kadmíum (Cd)	0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Kóbalt (Co)	0,000011	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005
Króm (Cr)	0,000111	0,000358	0,000705	0,000593	0,000625
Kopar (Cu)	0,000233	0,000678	0,00130	0,000543	0,000386
Járn (Fe)	0,0211	0,00140	0,00218	0,0145	0,00168
Kvikasilfur (Hg)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Lítíum (Li)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Mangan (Mn)	0,00245	0,000037	0,000146	0,000485	0,00156
Mólybden (Mo)	0,000105	0,000107	0,000210	0,000255	0,000174
Nikkel (Ni)	0,000117	0,000206	0,000090	0,000078	0,000994
Blý (Pb)	<0,00001	<0,00001	<0,00001	0,000012	<0,00001
Strontíum (Sr)	0,0267	0,00487	0,00783	0,0163	0,00528
Vanadíum (V)	0,0108	0,0131	0,0370	0,0184	0,0246
Sink (Zn)	0,00353	0,00181	0,00134	0,00249	0,00131
Uppleyst steinefni (UE)	178	55	88	122	68
δD (‰ SMOW)	-72,1	-73,3	-81,5	-76,3	-82,8
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-10,36	-10,77	-11,63	-10,81	-11,88

Tafla 17. (Frh.) Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum í Kelduhverfi 2019. Styrkur efna í mg/L.

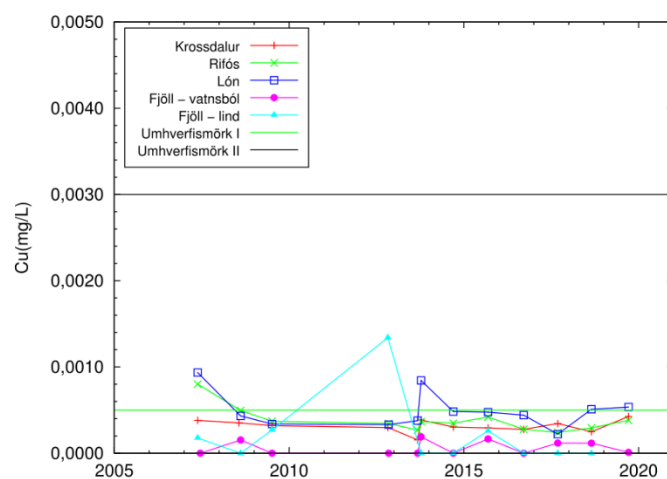
Staðarnafn	Krossdalur	Rífós	Lón	Fjöll, vatnsból
Staður	K-2745	K-2743	K-2744	K-568
Dagsetning	2019-09-18	2019-09-18	2019-09-18	2019-09-18
Sýnanúmer	20190200	20190201	20190202	20190203
Hitastig (°C)	4,3	10,7	4,9	3,1
Sýrustig (pH/°C) - ÍSOR	8,39 / 22,9	7,99 / 23,0	7,81 / 23,1	8,90 / 23,3
Sýrustig (pH/°C) - Felt	8,68 / 4,3	8,09 / 10,7	7,62 / 4,9	9,04 / 3,1
Leiðni við 25°C (µS/cm)	96,5	139	90,5	92,6
Karbonsat (CO ₂)	24,4	37,0	25,7	20,2
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Bór (B)	0,005	0,013	0,007	0,005
Kísill (SiO ₂)	21,9	31,4	21,2	12,1
Natríum (Na)	9,92	17,5	9,87	12,8
Kalíum (K)	0,85	1,45	0,94	0,12
Magnesíum (Mg)	2,71	3,46	2,72	0,39
Kalsíum (Ca)	6,34	7,09	4,95	7,07
Flúoríð (F)	0,10	0,10	0,07	0,03
Klóríð (Cl)	7,80	12,0	7,63	8,67
Brómíð (Br)	0,02	0,03	0,02	0,02
Súlfat (SO ₄)	4,03	9,18	2,82	2,37
Ál (Al)	0,00647	0,00481	0,00587	0,00517
Arsen (As)	0,000129	0,000130	0,000128	0,0000732
Baríum (Ba)	0,000108	0,000139	0,000106	0,000033
Kadmíum (Cd)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Kóbalt (Co)	<0,000005	<0,000005	0,000024	0,000005
Krómi (Cr)	0,000584	0,00108	0,00512	0,000255
Kopar (Cu)	0,000426	0,000382	0,000536	<0,00001
Járn (Fe)	0,000422	0,000709	0,0142	0,000436
Kvikasilfur (Hg)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Lítíum (Li)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Mangan (Mn)	0,000122	0,000044	0,000358	0,000033
Mólybden (Mo)	0,000167	0,000241	0,000933	0,000101
Nikkel (Ni)	<0,00005	<0,00005	0,00249	<0,00005
Blý (Pb)	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001
Strontíum (Sr)	0,00868	0,0117	0,00667	<0,001
Vanadíum (V)	0,0303	0,0352	0,0228	0,00944
Sink (Zn)	0,000724	0,000600	0,000579	0,000304
Uppleyst steinefni (UE)	72	107	66	58
δD (‰ SMOW)	-75,4	-80,8	-76,8	-71,0
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-10,93	-11,39	-11,01	-10,25



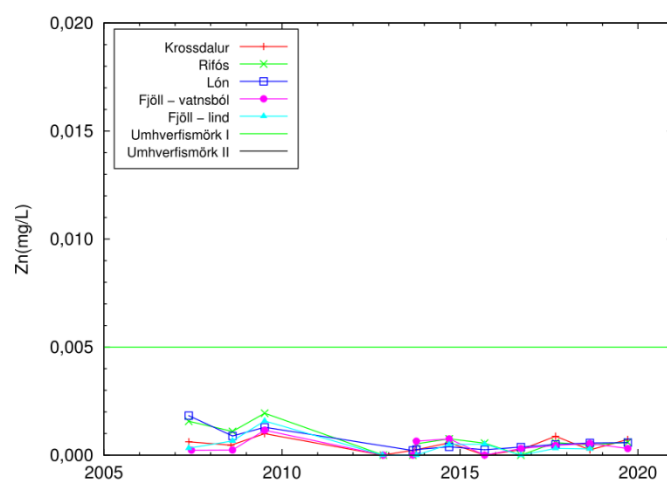
Mynd 70. Styrkur arsens í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I (0,0004 mg/L).



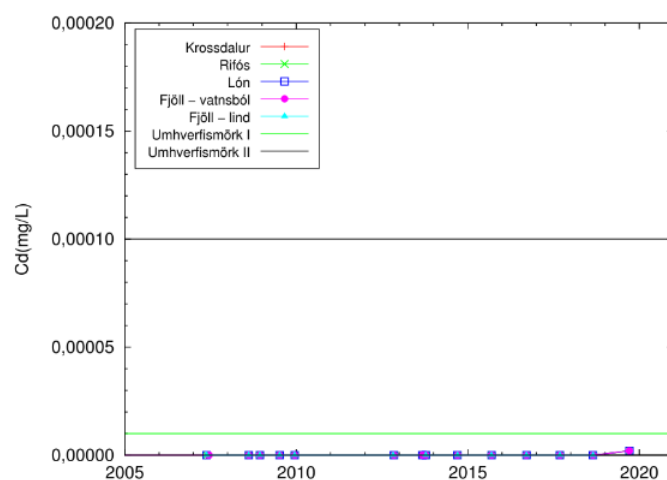
Mynd 71. Styrkur áls í vatni úr lindum í Kelduhverfi.



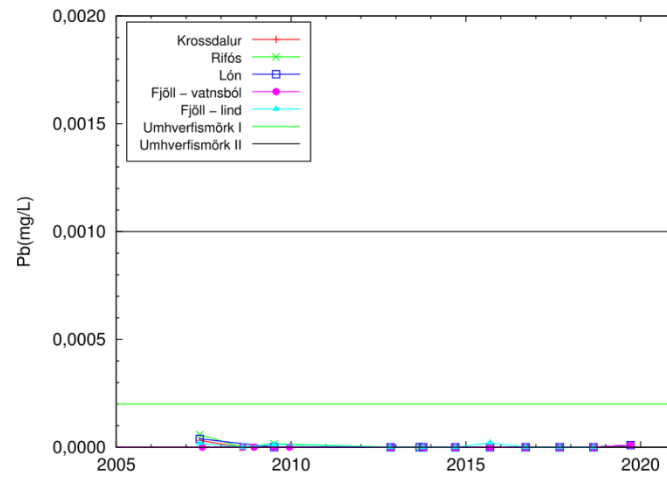
Mynd 72. Styrkur kopars í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I (0,0005 mg/L) og II (0,003 mg/L).



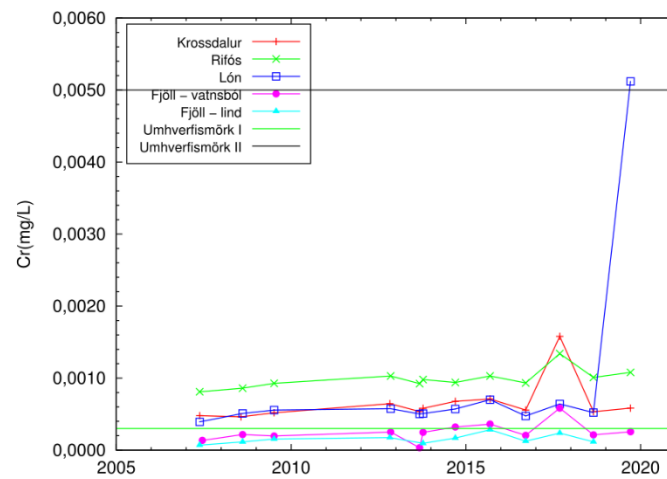
Mynd 73. Styrkur síns í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I (0,005 mg/L) og II (0,02 mg/L) efst á myndinni.



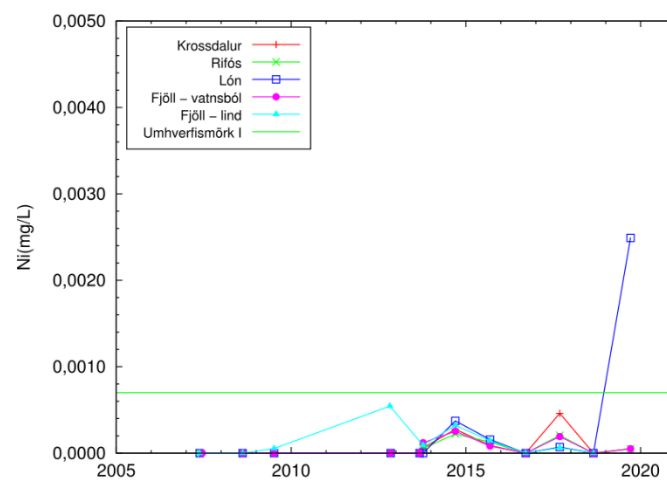
Mynd 74. Styrkur kadmíums í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I (0,00001 mg/L) og II (0,0001 mg/L).



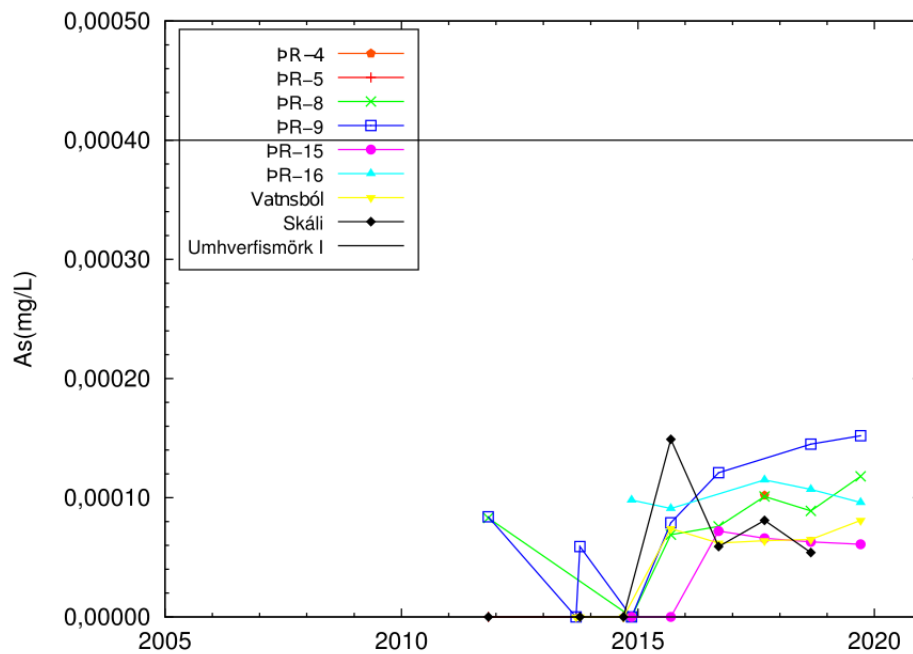
Mynd 75. Styrkur blýs í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I (0,0002 mg/L) og II (0,001 mg/L).



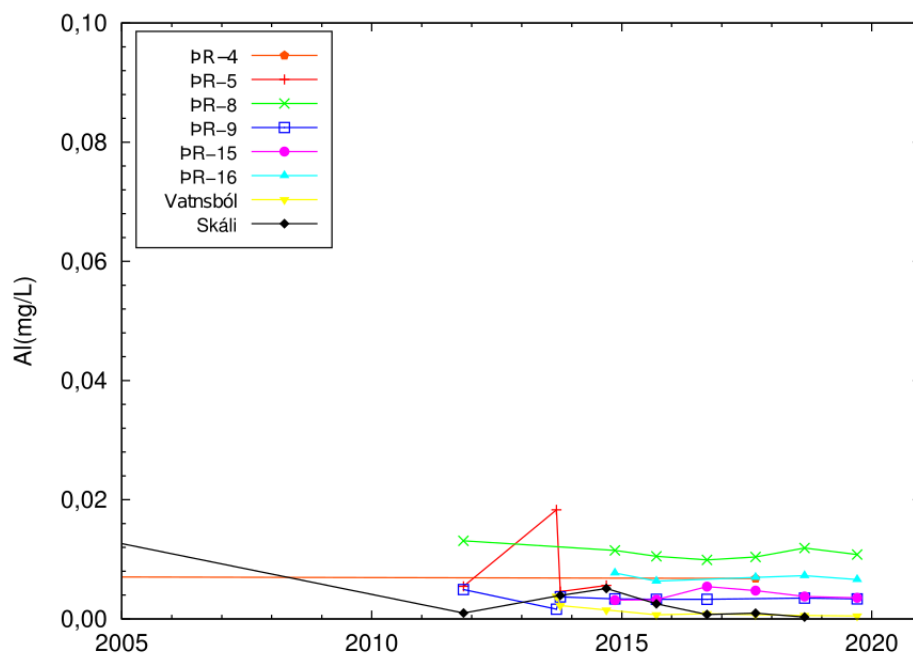
Mynd 76. Styrkur króms í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I (0,0003 mg/L) og II (0,005 mg/L) efst á myndinni.



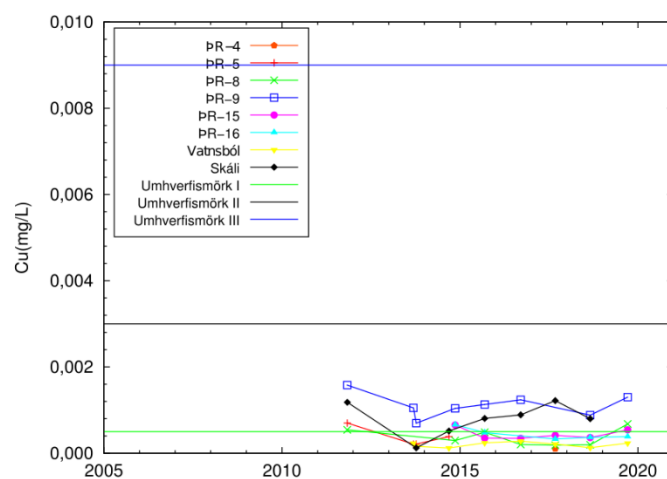
Mynd 77. Styrkur nikkels í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I (0,0007 mg/L).



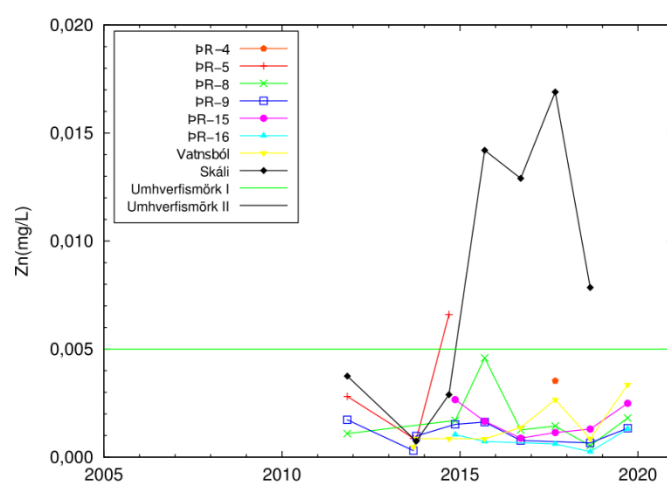
Mynd 78. Styrkur arsens í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I (0,0004 mg/L).



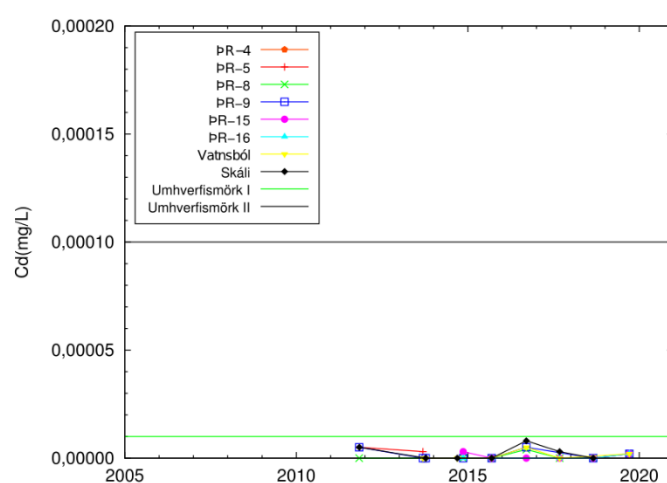
Mynd 79. Styrkur áls í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum. Viðmiðunarmörk fyrir neysluvatn (0,2 mg/L) falla utan kvarða myndarinnar.



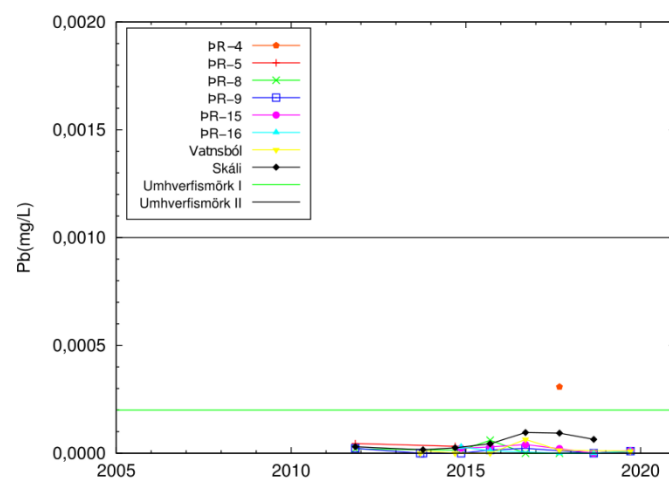
Mynd 80. Styrkur kopars í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I (0,0005 mg/L), II (0,003 mg/L) og III (0,009 mg/L).



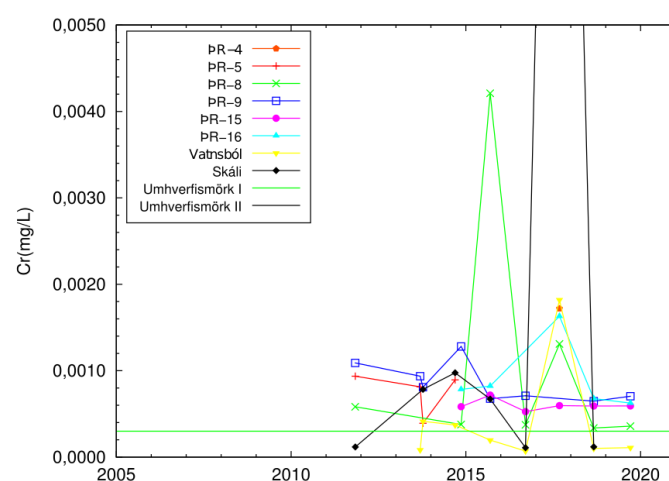
Mynd 81. Styrkur síns í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I (0,005 mg/L) og II (0,02 mg/L) efst á myndinni.



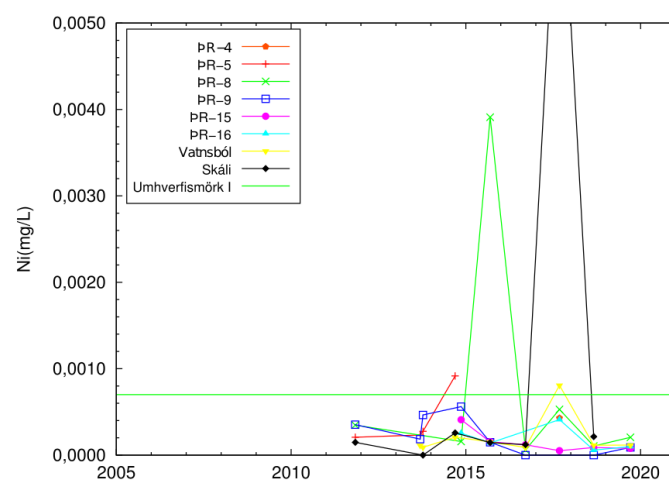
Mynd 82. Styrkur kadmíums í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I (0,00001 mg/L) og II (0,0001 mg/L).



Mynd 83. Styrkur blýs í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I (0,0002 mg/L) og II (0,001 mg/L).



Mynd 84. Styrkur króms í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I (0,0003 mg/L) og II (0,005 mg/L) efst á myndinni.



Mynd 85. Styrkur nikkels í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I (0,0007 mg/L).

5.4 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-11, borhola í Hrossadal
LUD-3, borhola í „Búrfellshrauni“

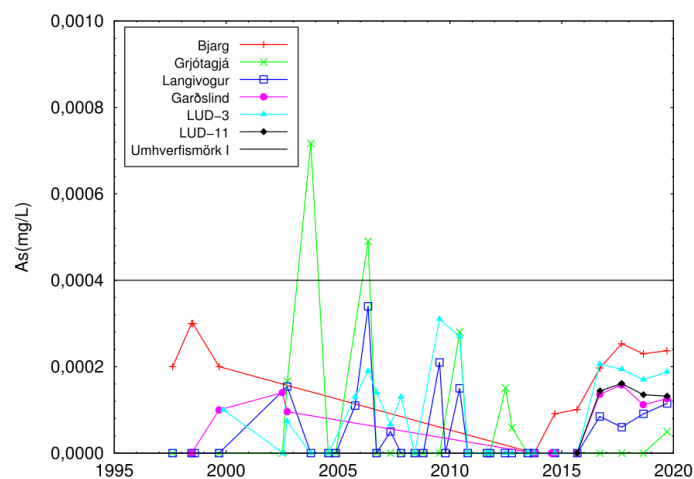
Þeistareykir og Kelduhverfi

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

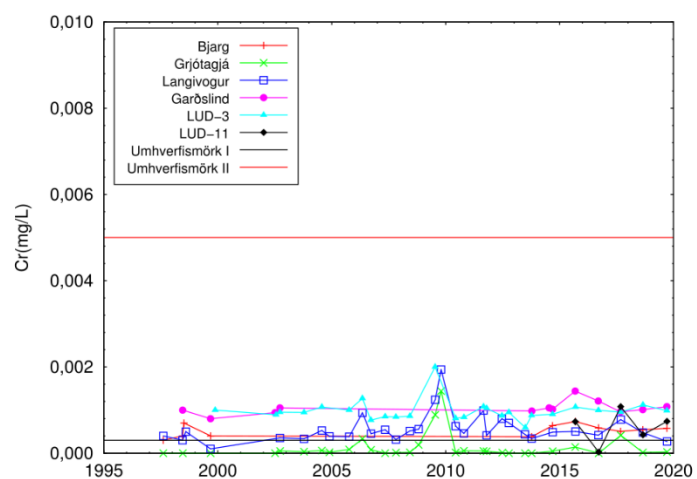
Eftirtalin efni og mæliþættir hafa verið valdir til að sýna niðurstöður fyrir ofangreinda staði:

Styrkur arsens (As)
Styrkur króms (Cr)
Styrkur kísils (SiO₂)
Mælt hitastig
Rafleiðni vatnsins

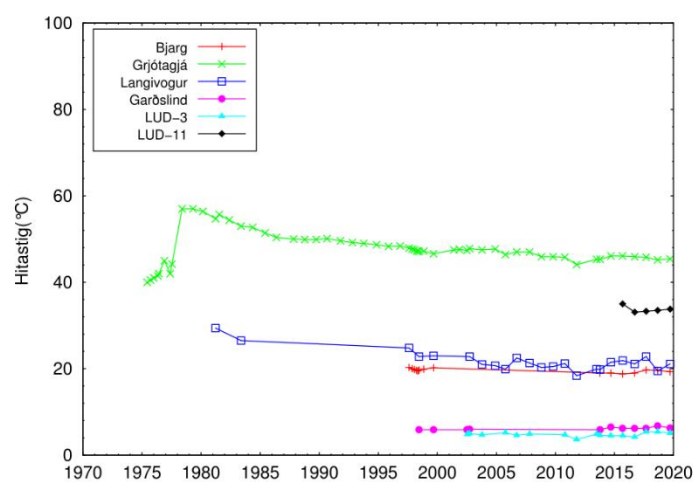
Niðurstöður mælinga og efnagreininga fyrir þá staði sem voru valdir eru sýndar á myndum 86–95. Leiðni hefur lækkað á flestum stöðum án þess að á því finnst augljós skýring.



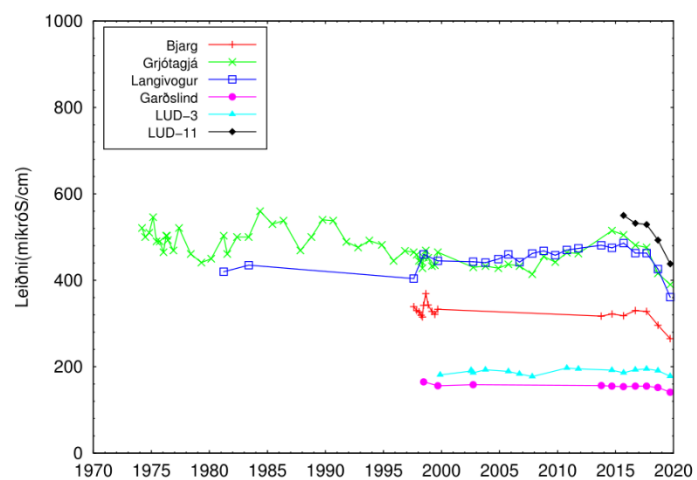
Mynd 86. Styrkur arsens (As) á völdum stöðum í Mývatnssveit.



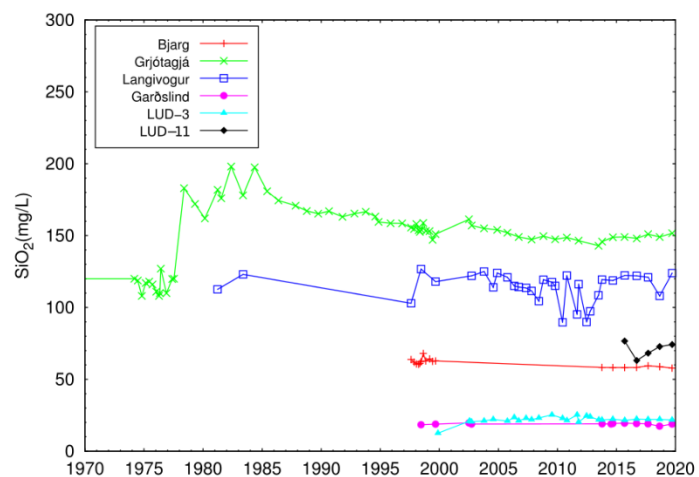
Mynd 87. Styrkur króms (Cr) á völdum stöðum í Mývatnssveit.



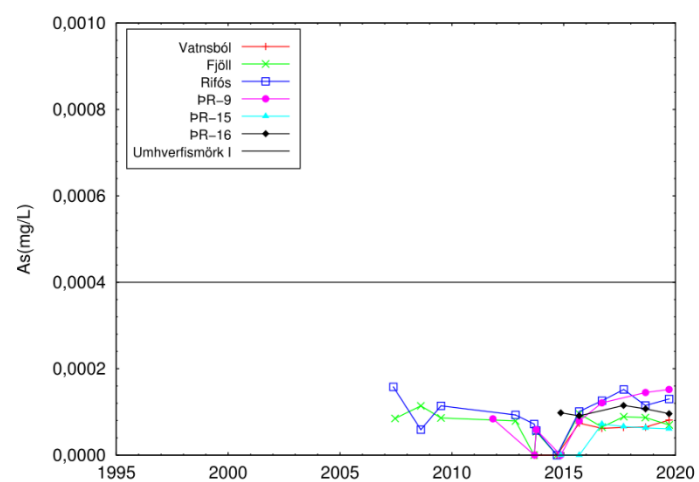
Mynd 88. Mælt hitastig við sýnatöku á völdum stöðum í Mývatnssveit.



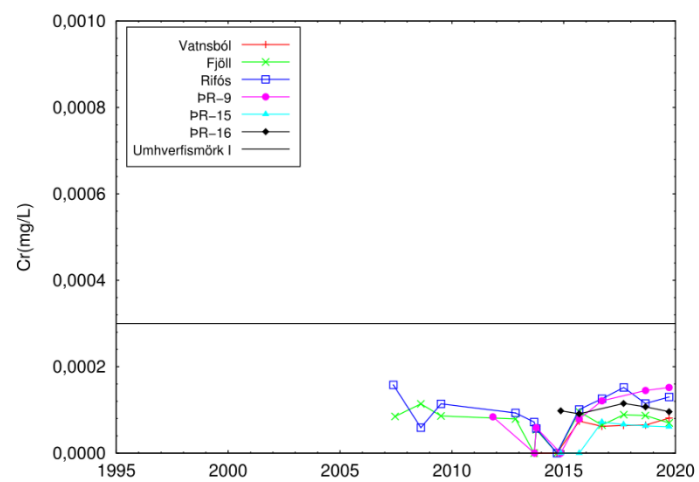
Mynd 89. Mæld rafleiðni í sýnum á völdum stöðum í Mývatnssveit.



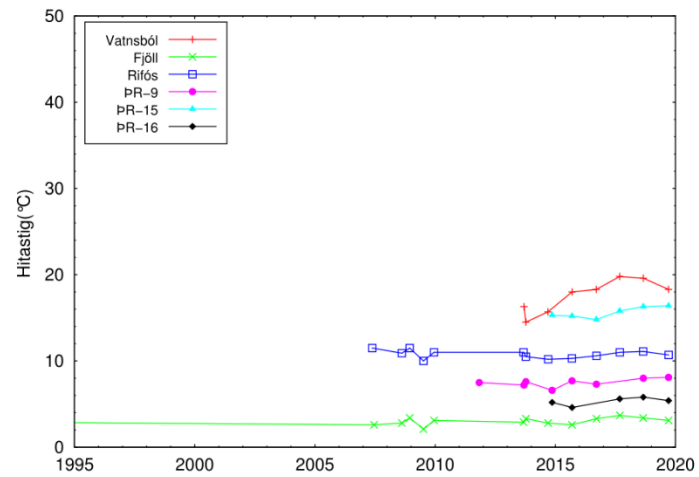
Mynd 90. Styrkur kísils (SiO_2) á völdum stöðum í Mývatnssveit.



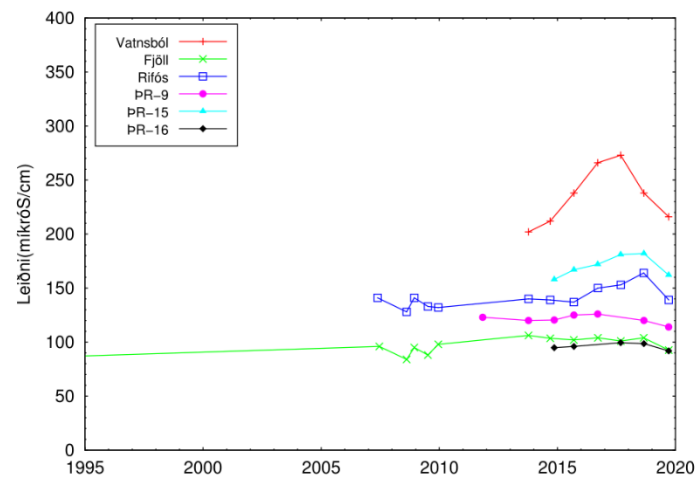
Mynd 91. Styrkur arsens (As) á völdum stöðum í Kelduhverfi og á Þeistareykjum.



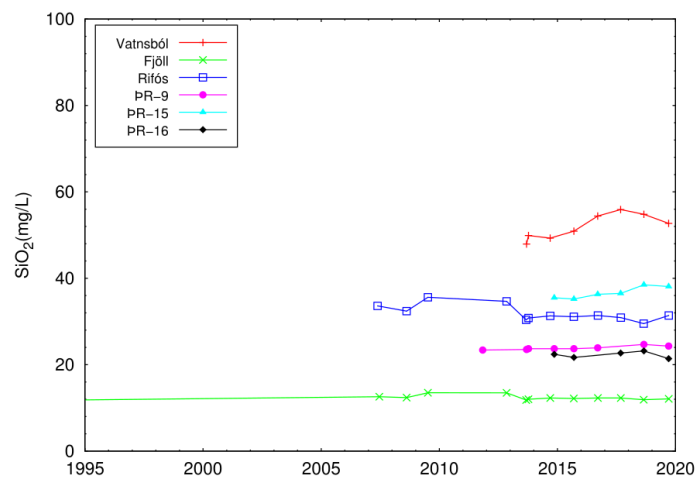
Mynd 92. Styrkur króms (Cr) á völdum stöðum í Kelduhverfi og á Þeistareykjum.



Mynd 93. Mælt hitastig við sýnatöku á völdum stöðum í Kelduhverfi og á Þeistareykjum.



Mynd 94. Mæld rafleiðni í sýnum á völdum stöðum í Kelduhverfi og á Þeistareykjum.



Mynd 95. Styrkur kísils (SiO_2) á völdum stöðum í Kelduhverfi og á Þeistareykjum.

6 Helstu niðurstöður

6.1 Þeistareykir

Yfirborðsvirkni

Dreifing jarðhitans sem kortlagður var á Þeistareykjum sumarið 2012, 2015 og 2018 var áþekk því sem áður hefur verið lýst af Gesti Gíslasyni o.fl 1984 og Kristjáni Sæmundssyni 2007. Þetta á að hluta til við um athuganir sumarsins 2019. Þeir staðir þar sem mesta breytingin í jarðhita hefur orðið frá 2012 og 2015 eru norðan og sunnan við holur ÞG-3, ÞG-6 og ÞG-7. Þar hefur virkni aukist til muna og enn eru að myndast nýir hverir norðan og norðvestan við holurnar og hin nýja virkni sunnan við ummyndunarblettinn suður af borteignum (borplan C) hefur aukist til muna frá 2017. Einnig hefur virkni aukist í norðvesturhlíðinni (niður við rætur Ketilfjalls og í hlíðinni), mun meiri gufuvirkni og aukin virkni er í gömlum skellum sem voru lítt áberandi áður. Jarðhitavirkni í norðurhluta Tjarnaráss er lítil en virkni við sæluhús og að Bæjarfjalli þar sem Tjarnarás gengur upp hefur aðeins aukist. Ætla má að aukin yfirborðsvirkni á Þeistareykjum tengist vinnslu sem nú er hafin á svæðinu en mestu breytingar á svæðinu frá 2012 hófust árið 2017.

Efnasamsetning gufu

Ekki hafa teljandi breytingar sést á efnasamsetningu gufu á Þeistareykjum síðan 2012 þótt stöku sýni skeri sig úr, helst vegna þéttingar gufu eða loftmengunar. Svæðið í Röndum er gassnauðara 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 bendir til djúpgufu í kerfinu, þ.e. að vökvinn í jarðhitageyminum sé tvífasa.

Tvívetnisgildi gufunnar í sýnum áranna 2012–2019 spanna bilið -124 til -108%, þó að undanskildu sýni úr nýrri virkni vestan undir Ketilfjalli (G-110) sem hefur $\delta D \approx -130\%$. Hugsanlegt er að sýnið hafi orðið fyrir svolítilli þéttingu þótt gasstyrkur bendi raunar ekki til þess. Samsætugildin eru almennt hæst á Þeistareykjagrundum en lægst í Ketilfjalli. Sýni frá Þeistareykjagrundum og sunnanverðum Röndum falla á úrkomulínuna, sýni úr Ketilfjalli hafa jákvæða súrefnishliðrun en sýni úr Tjarnarási og vestanverðum Röndum sýna neikvæða súrefnishliðrun. Sýni áranna 2018 og 2019 úr G-102 í Ketilfjalli sýna mun minni súrefnishliðrun en eldri sýni. Talið var að þetta tengdist vinnslu úr svæðinu en ekki er að sjá tilsvareandi breytingu í gufu úr vinnsluholum á svæðinu, t.d. ÞG-7 (Finnbogi Óskarsson, 2019). Rétt er að benda á að þessi tvö ár (2018 og 2019) var sýnum safnað úr suðurhluta skálarinnar í Ketilfjalli en árin á undan var safnað úr norðurhlutanum.

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 jarðhita-vökvinn ($\delta D \approx -72\%$ í vatnsbóli Þeistareykja en djúpvökvi háhitakerfisins hefur δD á bilinu -130% til -100%; Finnbogi Óskarsson, 2019. Hins vegar virðist sem gufan í Ketilfjalli (fram til 2017) gæti verið mynduð við suðu á djúpvökva líkum þeim sem er í holu ÞG-7 en gufa á Þeistareykjagrundum gæti verið mynduð við suðu á djúpvökva úr holu ÞG-1. Samsætu-hlutföll benda hins vegar til þess að gufa vestan Tjarnaráss hafi þést verulega við hitastig nærri eða neðan 200°C.

6.2 Krafla

Efnasamsetning gufu

Gufan sem stígur upp af hliðum Kröflu og Vítissvæðinu er mun gasríkari en gufan í Leirhnjúk. Samanlagður gasstyrkur í sýnum ársins er um 87 mmól/kg í Leirhnjúk, 324 mmól/kg við Víti, og 614 mmól/kg í Suðurhlíðum. Gasstyrkur í gufu í Leirhnjúki lækkar nokkuð milli ára, og hefur raunar gert það jafnt og þétt undanfarin ár, þetta á við um „jarðhitagösin“ CO₂, H₂S og H₂ meðan styrkur CH₄, N₂ og Ar helst stöðugur milli ára. Undanfarin ár hefur meðalgashiti reiknast 300–315°C í hliðum Kröflu og heldur lægri í Leirhnjúki, um 290–295°C, en meðalgashiti fyrir sýni ársins 2019 úr Leirhnjúki reiknast enn lægri; 279°C. Almennst hefur gashitamælunum borið vel saman en helstu frávik eru að H₂S-hitamælarnir gefa lægri gildi en hinir hitamælarnir fyrir Leirhnjúkssýnin og að CO₂-hitamælarnir gefa mjög há gildi 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 lakkandi. Flest sýnanna úr Suðurhlíðum hafa sömuleiðis verið á því bili. Sýni úr Vesturhlíðum og Hveragili eru sömuleiðis snauð að tvívetni, almennt með $\delta D \leq -114$ ‰. Sýnin sem safnað er norðan Vítis eru áberandi þyngst, með $\delta D > -100$ ‰. Gufuaugnasýnin eru almennt talsvert tvívetnis-snaudari en sem nemur áætluðum djúpvökva í kerfinu (δD á bilinu -94 til -87‰; Pope o.fl., 2016), nema sýnin sem safnað er norðan Vítis. Samanburður við samsætuhlutföll í grunnvatni og djúpvökva Kröflukerfisins gefur til kynna að gufa á Vítissvæðinu sé tilkomin við þrýstifallssuðu gufuhitaðs grunnvatns, gufan í Suðurhlíðum og Leirhnjúki gæti annaðhvort einnig verið mynduð við slíka suðu eða komin frá grunnvatni sem sýður við 100°C. Sennilegast er að léttari gufa sé af sama meiði en að hluti gufunnar hafi þétt nærri 100°C

6.3 Námafjall

Efnasamsetning gufu

Talsverður innbyrðis munur er milli þeirra þriggja undirsvæða í Námafjalli þar sem gufu-virkni 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. Gasstyrkur í Bjarnarflagi lækkaði talsvert frá 1995 til 2014 en hefur verið nokkuð stöðugur frá 2015. Hár vetnisstyrkur í gufu 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. Léttasta gufan ($\delta D \approx -120$ ‰) er austast í kerfinu, í Hverum, og þar er súrefnishliðrun einnig mest (8 til 9‰). Þegar komið er upp á Námafjall sjálft mælist meira af tvívetni og gildi á bilinu -115 til -110‰ mega teljast dæmigerð. Súrefnishliðrun á þessu svæði er 3 til 5‰ sem bendir til þess að efnaskipti milli bergs og vatns séu ekki gengin jafn langt og í Hverum. Sýnin úr Bjarnarflagi hafa tvívetnisgildi á bilinu -120 til -108‰ og sýna svolitla neikvæða súrefnishliðrun (< 1 ‰), þ.e. liggja vinstra megin við úrkomulínuna. Það kann að benda til þess að gufan þar sé mynduð við suðu á grunnvatni eða blöndu djúpvatns og grunnvatns en gufan á hrygg Námafjalls virðist vera 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.

6.4 Niðurstöður - Grunnvatn

6.4.1 Mývatnssveit

Á árinu 2019 fór sýnataka á grunnvatni fram í september og var alls safnað vatni til efnagreininga á 15 vöktunarstöðum. Að ósk Landsvirkjunar voru sýni ekki tekin úr holum AE-10 og LUD-5, Stórugjá og Hverfjallsgjá. Þá var dæla í holu AB-2 biluð og því var sýni ekki safnað úr henni.

Fáar marktækar breytingar koma fram í styrk arsens milli áranna 2018 og 2019. Styrkur arsens í LUD-4 hefur mælst svipaður síðastliðin fimm ár eða svo, rétt um 0,004 mg/L og talsvert lægri en hann var t.d. um 2010. Í Bjarnarflagslóni mældist styrkur arsens 0,185 mg/L, sem er yfir umhverfismörkum IV og svipaður og hann hefur verið allt frá því um 2000 þegar mælingar hófust. Í vatni frá skiljustöð í Kröflu mældist styrkurinn áþekkur og undanfarin ár, lítið eitt hærri en umhverfismörk III, sem eru 0,015 mg/L. Í LUD-4 mældist arsenstyrkur innan umhverfismarka II.

Styrkur arsens í eftirlitsholum, öðrum en LUD-4, og heitum og köldum lindum í Mývatnssveit fellur í öllum tilvikum nærri eða innan umhverfismarka I ($\leq 0,0004$ mg/L). Styrkur arsens mælist innan greiningarmarka í Grjótagjá og Vogagjá.

Styrkur áls í Bjarnarflagslóni mældist svipaður nú og hann hefur verið lengst af og einnig í LUD-4. Styrkur áls mældist svipaður í vatni frá skiljustöð í Kröflu og í Bjarnarflagslóni, 1,52 mg/L annars vegar og 1,36 mg/L hins vegar og vel yfir hámarksgildi fyrir neysluvatn (0,2 mg/L) en undir hámarksgildi fyrir neysluvatn á öllum öðrum stöðum.

Líkt og í umhverfisvöktunarskýrslum undanfarin ár 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. Í heild er styrkur þessara efna almennt lágur og oft nærri greiningarmörkum efnagreiningaraðferðanna.

6.4.2 Þeistareykir og Kelduhverfi

Grunnvatn á Þeistareykjum og í Kelduhverfi er vaktað á sama hátt og í Mývatnssveit. Djúpdælur eru í eftirlits- og vinnsluholum. Sýnataka fór fram í september 2019 og voru sýni tekin á fimm stöðum á Þeistareykjum og fjórum stöðum í Kelduhverfi. Að ósk Landsvirkjunar var ekki tekið sýni úr lind sunnan við Fjöll í Kelduhverfi að þessu sinni, auk þess sem sýnatöku við Þeistareykjaskála var sleppt.

Styrkur arsens er á öllum vöktunarstöðum innan við umhverfismörk I ($\leq 0,0004$ mg/L) og styrkur áls er innan við hámarksgildi fyrir neysluvatn (0,2 mg/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. Í heild er styrkur þessara efna almennt lágur og oft nærri greiningarmörkum efnagreiningaraðferðanna, sem endurspeglar að einhverju leyti í óreglulegum sveiflum í styrk efnanna. Á myndum eru sýnd umhverfismörk samkvæmt reglugerðinni frá 1999. Að þessu sinni komu fram frávík í styrk króms, nikkels og fleiri málma í sýni frá Lóni í Kelduhverfi og virðist sem sýnið hafi „mengast“ með einum eða öðrum hætti við sýnatöku eða efnagreiningu.

7 Heimildaskrá

- Auður Agla Óladóttir (2010). *Gasflæðimælingar um yfirborð í Námafjalli sumarið 2010*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2010/075, Landsvirkjun, LV-2010/128.
- 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.
- Finnbogi Óskarsson (2019). Peistareykir. Stöðugar samsætur vetnis og súrefnis í vatni og gufu. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2019/037 (LV-2019-042), 18 s. Unnið fyrir Landsvirkjun.
- Finnbogi Óskarsson (2011). *Háhitaholur á Peistareykjum. Efnasamsetning vökva og gufu 2011*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2011/068.
- Finnbogi Óskarsson (2012a). *Niðurstöður efnagreininga á sýnum úr holum B-13 og B-14*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-12054.
- Finnbogi Óskarsson (2012b). *Hola ÞG-7 á Peistareykjum. Niðurstöður efnagreininga árið 2012*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2012/066.
- Gestur Gíslason, Gunnar Johnsen, Halldór Ármannsson, Helgi Torfason og Knútur Árnason (1984). *Peistareykir – Yfirborðsrannsóknir á háhitasvæðinu*. Orkustofnun, OS-84089/JHD-16. 134 bls. + 3 kort.
- Halldór Ármannsson (1993). *Jarðhitakerfið í Námafjalli. Efnifræðileg 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 og Trausti Hauksson (1980). *Krafla. Samsetning gass í gufuaugum*. Orkustofnun, OS-80027/JHD-16, 51 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.
- Haukur Jóhannesson og Kristján Sæmundsson (2005). *Flokkun jarðhitafyrirbæra á háhitavæðum*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2005/023, 21 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 áranna 1979 og 1984/1985*. Orkustofnun, OS-85075/JHD-26 B, 28 bls.
- Jón Benjamínsson (1999). *Kröflusvæði. Yfirborðsathuganir og efnagreiningar haustið 1999*. Landsvirkjun – Kröflustöð, 19 bls.
- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (1988). *Kröflusvæði, gufuaugu 1988*. Landsvirkjun – Kröflustöð, 38 bls.
- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (1989). *Kröflusvæði: rannsóknir á gufuaugum 1989*. Landsvirkjun – Kröflustöð, 38 bls.
- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (1990). *Kröflusvæði. Rannsóknir á gufuaugum 1990*. Landsvirkjun – Kröflustöð, 43 bls.

- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (1993). *Kröflusvæði: rannsóknir á gufuaugum 1992*. Landsvirkjun – Kröflustöð, 38 bls.
- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (1994). *Kröflusvæði og Námafjall. Rannsóknir á gufuaugum og frá rennsli 1993*. Landsvirkjun – Kröflustöð, 30 bls.
- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (1995). *Kröflusvæði og Námafjall. Yfirborðsathuganir haustin 1994 og 1995*. Landsvirkjun – Kröflustöð, 20 bls.
- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (1996). *Kröflusvæði og Námafjall. Yfirborðsathuganir og efnagreiningar haustið 1996*. Landsvirkjun – Kröflustöð, 31 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 (2000). *Kröflusvæði og Námafjall. Yfirborðsathuganir og efnagreiningar 2000. Yfirlit um Kröflusvæðið*. Landsvirkjun – Kröflustöð, 33 bls.
- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (2001). *Kröflusvæði. Umhverfisvöktun 2001*. Landsvirkjun – Kröflustöð, 41 bls.
- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (2004). *Kröflusvæði og Bjarnarflag. Umhverfisvöktun 2004*. Landsvirkjun – Kröflustöð, 27 bls.
- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (2008). *Kröflusvæði og Bjarnarflag. Umhverfisvöktun árið 2007*. Landsvirkjun – Kröflustöð, 33 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 (2010). *Kröflusvæði og Bjarnarflag. Umhverfisvöktun árið 2009*. Landsvirkjun – Kröflustöð, LV-2010/110, 39 bls.
- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (2011). *Kröflusvæði og Bjarnarflag. Umhverfisvöktun 2011*. Landsvirkjun, LV-2011/119, 37 bls.
- Jón Benjamínsson og Trausti Hauksson (2012). *Kröflusvæði og Bjarnarflag. Umhverfisvöktun 2011*. Landsvirkjun, LV-2012/120, 43 bls.
- Kristján Sæmundsson (2007). *Jarðfræðin á Þeistareykjum. Íslenskar orkurannsóknir, greinargerð, ÍSOR-07270*, 23 bls.
- Magnús Ólafsson og Ásgrímur Guðmundsson (2017). *Vöktunarstaðir í Mývatnssveit, á Þeistareykjum og í Kelduhverfi. Íslenskar orkurannsóknir, minnisblað, 20. desember 2017*.
- Maryam Khodayar, Sveinbjörn Björnsson, Ragna Kalsdóttir, Kristján Ágústsson og Magnús Ólafsson (2015). *Tectonic Control of Alteration, Gases, Resistivity, Magnetism and Gravity in Þeistareykir Area. Implications for Northern Rift Zone and Tjörnes Fracture Zone. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2015/002, Landsvirkjun, LV-2015-039*, 59 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 Níelsson (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/döhp

Viðauki 1: Sýnameðhöndlun og efnagreiningaraðferðir

Gufusýni

Ósúrt gas (H_2 , CH_4 , N_2 , O_2 , 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 tilsvarende toppa fyrir róf af staðalgasi.

Koldíoxíð (CO_2): Sýnum er safnað í lút í lofttæmdar glerflöskur og þau greind með títrun með HCl frá pH 8,2 niður í pH 3,8. Leiðrétt er fyrir styrk CO_2 í blindsýnum og styrk H_2S .

Brennisteinsvetni (H_2S): 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, annaðhvort strax við söfnun eða að sýnum er safnað á loftþéttar glerflöskur og sýrustig þeirra mælt við stofuhita eigi síðar en tveimur sólarhringum eftir söfnun.

Karbónat (CO_2): Sýnum er safnað á loftþéttar glerflöskur og þau greind með títrun með HCl frá pH 8,2 niður í pH 3,8 og baktítrun með NaOH frá pH 3,8 upp í pH 8,2 eigi síðar en tveimur sólarhringum eftir söfnun. Leiðrétt er fyrir klofnun H_2S , H_2O og fleiri daufra sýra.

Brennisteinsvetni (H_2S): Greint strax við söfnun. Títrað með kvikasilfursasetati í basískri lausn með dithizone í acetoni sem litvísi.

Rafleiðni: Mæld með spennumælingu, annaðhvort strax við söfnun eða að sýnum er safnað á loftþéttar glerflöskur og leiðni þeirra mæld eigi síðar en tveimur sólarhringum eftir söfnun. Leiðnigildi við stofuhita eða söfnunarhita eru umreiknuð og gefin upp við 25°C.

Aðalmálmur (Na, K, Mg, Ca): Sýnin eru síuð (0,2 μm) við söfnun, þau sett á plastflöskur og sýrð með saltpéturssýru (*suprapur*). Greining er í langflestum tilfellum gerð með atómisogsmælingum (AAS) á rannsóknarstofu ÍSOR en í sumum tilfellum (vorsýni) með rafgasgreiningum (ICP-AES) á rannsóknarstofu ALS í Svíþjóð.

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-AES/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, NO_3 , SO_4): Sýni eru síuð (0,2 μm) við söfnun og geymd á plastflöskum. Þar sem styrkur H_2S er hærri en 1 mg/L er ZnS fellt úr lausninni við söfnun. Greining með jónaskiljun (IC) á rannsóknarstofu ÍSOR.

Bór (B): Sýni eru síuð (0,2 μm) á plastflöskur við söfnun og greind á rannsóknarstofu ÍSOR. Greint með mælingu á ljósgleypni bór-azómethín kompleks við 415 nm bylgjulengd.

Kísill (SiO_2): Ómeðhöndluðum eða þynntum (1:2 eða 1:10 þynning með eimuðu vatni) sýnum safnað á plastflöskur og kísilstyrkur greindur með mælingu á ljósgleypni kísilmólybdat komplex í súrri lausn við 410 nm bylgjulengd.

Uppleyst steinefni (TDS): Sýni eru síuð ($0,2\ \mu\text{m}$) 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 $\delta^{18}\text{O}$): 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).

Viðauki 2: Gasflæði (CO₂) um jarðveg

