



Landsvirkjun

LV-20Hl-0pp

Í Kæðl-áð η śλγ † uŜăăŭl·NŜëŕdzYΣ
N YN I ffdz 23 b†Yl·Ŧ2l·ffλ

±l ŕúdy † òŦANŭō2NŭśăŕNŭŕyλ 23 ENŭdzYŕŕŭŕ·ŭŕλ †Nŭś HΛHΛ

Háhitasvæðin á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli

Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2020



ÍSOR-2020/053

Verknr.: 20-0109

Desember 2020

Skýrsla LV nr.: LV-2020-055Dags: Desember 2020Fjöldi síðna: 88 +
viðauki 2

Upplag: 1

Dreifing:

- ☒ Birt á vef LV
☒ Opin
☐ Takmörkuð til

Titill: Háhitasvæðin á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2020

Höfundar/fyrirtæki: Albert Þorbergsson, Gunnlaugur M. Einarsson, Auður Agla Óladóttir, Deirdre Clark, Heimir Ingimarsson og Finnogi Óskarsson

Verkefnisstjóri: Ásgerður K. Sigurðardóttir f.h. LV Steinþór Níelsson f.h. ÍSOR

Unnið fyrir:**Samvinnuaðilar:****Útdráttur:**

Jarðhitavirkni á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli hefur verið kortlögð og könnuð reglulega á síðustu áratugum. Sumarið 2020 var skipt um aðferðafræði við kortlagningu jarðhitavirkni á Þeistareykjum; í stað athugana á jörðu niðri voru teknar ljósmyndir og hitamyndir úr lofti með dróna. Samanburður við eldri loftmyndir og jarðhitakort sýnir aukna jarðhitavirkni á tveimur svæðum, við norðurbrún Bæjarfjalls, þar sem virkni er að teygja úr sér til vesturs, og við Ketilfjall þar sem ný virkni er að koma fram nálægt borteig C (holum ÞG-3, ÞG-6 og ÞG-7).

Jarðvegshitastig og koldíoxíðflæði var mælt í 1080 mælipunktum á Þeistareykjum sumarið 2020. Samanburður á koldíoxíðflæði eldri mælinga (frá 2018, 2015 og 2012) og mælinga frá 2020 sýndu að nokkur aukning hefur orðið í koldíoxíðflæði á norðurhluta Randa og í norðurhlíðum Bæjarfjalls. Virknin meðfram Ketilfjalli hefur haldið áfram að teygja sig til norðurs frá því mælt var 2018. Sjáanleg og mælanleg aukning hefur orðið í jarðhitavirkni á yfirborði, þ.e. bæði jarðvegshita og koldíoxíðflæði sunnan við borteig C og í átt að Bóndhólsskarði.

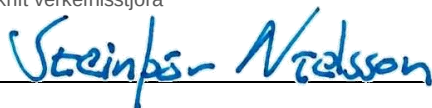
Grunnvatn í Mývatnssveit, í Kelduhverfi og á Þeistareykjum er kannað árlega og var svo einnig gert 2020 í þeim tilgangi að meta áhrif frá affallsvatni frá jarðhitavirkjununum. Vöktunin 2020 sýnir engar meiri háttar breytingar frá fyrri árum. Eftirlit með efnasamsetningu grunnvatns síðustu áratugina sýnir 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. Engin slík ummerki um affallsvatn frá Þeistareykjavirkjun sjást heldur á vöktunarstöðum á Þeistareykjum og í Kelduhverfi.

Lykilorð:

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

ISBN nr.:**Samþykki verkefnisstjóra
Landsvirkjunar**

Undirskrift verkefnisstjóra



Yfirfarið

Sigurður G. Kristinsson

Efnisyfirlit

1	Inngangur	9
2	Þeistareykir	11
2.1	Yfirborðsvirkni á Þeistareykjum	11
2.2	Kortlagning með dróna 2020	13
2.2.1	Randir	17
2.2.2	Tjarnarás	21
2.2.3	Bæjarfjall	24
2.2.4	Ketilfjall	28
2.2.5	Samanburður við eldri gögn	32
2.2.6	Samantekt	40
2.3	Gasflæði um jarðveg á Þeistareykjum	41
2.3.1	Almennt um gasflæðimælingar	41
2.3.2	Gasflæðimælingar á Þeistareykjum sumarið 2020	42
2.3.3	Niðurstöður	44
2.3.4	Samantekt	52
3	Vöktun grunnvatns í Mývatnssveit, á Þeistareykjum og í Kelduhverfi	53
3.1	Mývatnssveit	53
3.2	Næringarefni í sýnum úr Mývatnssveit	69
3.3	Þeistareykir og Kelduhverfi	71
3.4	Vísar og sjálfbærni	79
4	Helstu niðurstöður	82
4.1	Þeistareykir	82
4.1.1	Yfirborðsvirkni	82
4.1.2	Gasflæði um jarðveg	82
4.2	Grunnvatn	82
4.2.1	Mývatnssveit	82
4.2.2	Þeistareykir og Kelduhverfi	83
5	Heimildaskrá	84
	Viðauki 1: Sýnameðhöndlun og efnagreiningaraðferðir	88
	Viðauki 2: Stafræn myndagögn	

Töflur

Tafla 1.	Loftmyndagögn sem skoðuð voru til samanburðar	32
Tafla 2.	Vöktunarstaðir og yfirlit um dælt magn úr vöktunarholum í Mývatnssveit 2020	55
Tafla 3.	Umhverfismörk fyrir málma í yfirborðsvatni til verndar lífríki (styrkur efna í µg/L)	56
Tafla 4.	Niðurdæling og vinnsla vökva í Kröflu (í þúsundum tonna) frá 2015 til 2020	57
Tafla 5.	Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum haustið 2020. Styrkur efna er í mg/L	59
Tafla 6.	Niðurstöður efnagreininga á næringarefnum í sýnum úr Mývatnssveit (mg/L)	69

Tafla 7. Vöktunarstaðir og yfirlit um dælt magn úr vöktunarholum á Þeistareykjum og í Keldu- hverfi 2020	71
Tafla 8. Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum á Þeistareykjum 2020. Styrkur efna í mg/L ..	74
Tafla 9. Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum í Kelduhverfi 2020. Styrkur efna í mg/L	75

Myndir

Mynd 1. Yfirlitskort af þeim svæðum sem fjallað er um í skýrslunni	10
Mynd 2. Jarðhitakort af Þeistareykjum	12
Mynd 3. Staðsetning myndmiðja loftljósmynda	13
Mynd 4. Staðsetning myndmiðja hitamynda	14
Mynd 5. Staðsetning GPS-viðmiðunarpunkta	14
Mynd 6. Samsett og upprétt loftljósmynd af þekktum virkum jarðhita á Þeistareykjum	15
Mynd 7. Samsett hitamynd af virkum jarðhita á Þeistareykjum	16
Mynd 8. Samsett hæðarlíkan af virkum jarðhita á Þeistareykjum	16
Mynd 9. Flugljósmynd af Röndum. Horft til suðurs	17
Mynd 10. Yfirlitsmyndir af Röndum	18
Mynd 11. Nærmyndir af virkum jarðhita við Randir	19
Mynd 12. Loftmynd. Horft eftir Tjarnarási til NNV	21
Mynd 13. Yfirlitsmyndir af Tjarnarási	22
Mynd 14. Nærmyndir af virkum jarðhita í Tjarnarási	23
Mynd 15. Flugljósmynd sem sýnir virka jarðhitann við sæluhúsið. Horft til norðausturs	24
Mynd 16. Flugljósmynd sem sýnir jarðhitavirkni við Bæjarfjall. Horft til suðurs	24
Mynd 17. Myndkort sem sýnir jarðhitasvæðið við Bæjarfjall	25
Mynd 18. Hitamynd af jarðhitasvæðinu við Bæjarfjall	25
Mynd 19. Þrívíð samsett mynd sem sýnir loftmynd og hitastig við Bæjarfjall	26
Mynd 20. Nærmyndir af virkum jarðhita við Bæjarfjall	26
Mynd 21. Nærmyndir af virkum jarðhita við Bæjarfjall og Bóndhól	27
Mynd 22. Yfirlitsmyndir af Ketilfjalli	29
Mynd 23. Þrívíð samsett mynd sem sýnir loftmynd og hitastig við Ketilfjall og neðanvert Bóndhóls- skarð.	30
Mynd 24. Nærmyndir af virkum jarðhita við Bæjarfjall.	31
Mynd 25. Loftmynd frá 1998 af jarðhitasvæðinu á Þeistareykjum	32
Mynd 26. Loftmynd frá 2007 af jarðhitasvæðinu á Þeistareykjum	33
Mynd 27. Loftmynd frá 2014 af jarðhitasvæðinu á Þeistareykjum	33
Mynd 28. Drónamynd frá 2020 af jarðhitasvæðinu á Þeistareykjum	34
Mynd 29. Jarðhiti á Röndum eins og hann kemur fram á drónamyndum 2020 borinn saman við ummyndunarfláka af jarðhitakorti og kortlagða jarðhitapunkta	35
Mynd 30. Jarðhiti við norðanvert Bæjarfjall eins og hann kemur fram á drónamyndum 2020 borinn saman við ummyndunarfláka af jarðhitakorti og kortlagða jarðhitastaði	36
Mynd 31. Virkur jarðhiti ofan á jarðhitakorti	37
Mynd 32. Ummyndun sem greina má á flugmyndum ofan á jarðhitakorti	38

Mynd 33. Virkur jarðhiti og ummyndun sem reiknuð er af drónamyndum.....	39
Mynd 34. Annar af gasflæðimælunum sem notaðir voru til mælinga á Þeistareykjum	42
Mynd 35. Mælingar á jarðvegshitastigi og koldíoxíðgasflæði um jarðveg á Þeistareykjum	43
Mynd 36. Niðurstöður gasflæðimælinga um jarðveg á Þeistareykjum.....	45
Mynd 37. Gasflæðimælingar á Þeistareykjum 2018 og 2020 hægra megin.....	46
Mynd 38. Niðurstöður jarðvegshitamælinga á 15 cm dýpi sem gerðar voru samtímis mælingum á koldíoxíðflæði.....	47
Mynd 39. Gasflæði um jarðveg og jarðvegshiti á Þeistareykjum 2015, 2018 og 2020	48
Mynd 40. Koldíoxíðflæði um jarðveg á öllum fjórum mælilínunum sem mældar voru sumarið 2020 samanborið við eldri mælingar frá 2012, 2015 og 2018.....	50
Mynd 41. Hitastig á 15 cm dýpi í jarðvegi á öllum fjórum mælilínunum sem mældar voru sumarið 2020 samanborið við eldri mælingar frá 2012, 2015 og 2018.....	51
Mynd 42. Sýnatökustaðir í Mývatnssveit.....	54
Mynd 43. (A) Styrkur arsens í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt umhverfismörkum I, II, III og IV og mörkum fyrir neysluvatn (10 µg/L). (B) Sama mynd með smærri kvarða til betri aðgreiningar á niðurstöðum	62
Mynd 44. (A) Styrkur arsens í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I og II. Viðmiðunarmörk fyrir styrk arsens í neysluvatni (10 µg/L) eru efst á myndinni. (B) Niðurstöðum fyrir LUD-4 hefur verið sleppt til betri aðgreiningar á niðurstöðum	62
Mynd 45. Styrkur arsens í lindum við Mývatn ásamt umhverfismörkum I (0,4 µg/L).....	63
Mynd 46. Styrkur áls í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt viðmiðunarmörkum fyrir neysluvatn (200 µg/L).....	63
Mynd 47. (A) Styrkur áls í vatni úr borholum ásamt viðmiðunarmörkum fyrir neysluvatn (200 µg/L). (B) Niðurstöðum fyrir LUD-4 hefur verið sleppt til betri aðgreiningar á niðurstöðum	64
Mynd 48. Styrkur áls í vatni í lindum við Mývatn.....	64
Mynd 49. Styrkur kopars (A), síns (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt umhverfismörkum I, II og III	65
Mynd 50. Styrkur arsens (A), klóríðs (B), kísils (C), natríums (D), bórs (E) og brómíðs (F) í vatni frá Bjarnarflagslóni. Aðeins As hefur umhverfismörk.....	66
Mynd 51. Styrkur kopars (A), síns (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I, II og III.....	67
Mynd 52. Styrkur kopars (A), síns (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum I, II og III	68
Mynd 53. Styrkur köfnunarefnis og fosfats í sýnum úr Mývatnssveit	70
Mynd 54. Sýnatökustaðir í Kelduhverfi og á Þeistareykjum.	72
Mynd 55. Styrkur arsens (A) og áls (B) í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I 76	
Mynd 56. Styrkur arsens (A) og áls (B) í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I	76
Mynd 57. Styrkur kopars (A), síns (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I og II	77
Mynd 58. Styrkur kopars (A), síns (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I, II og III	78

Mynd 59. Styrkur arsens (A), króms (B), kísils (C), hitastig (D) og rafleiðni (E) á völdum stöðum í Mývatnssveit	80
Mynd 60. Styrkur arsens (A), króms (B), kísils (C), hitastig (D) og rafleiðni (E) á völdum stöðum í Kelduhverfi og á Þeistareykjum	81

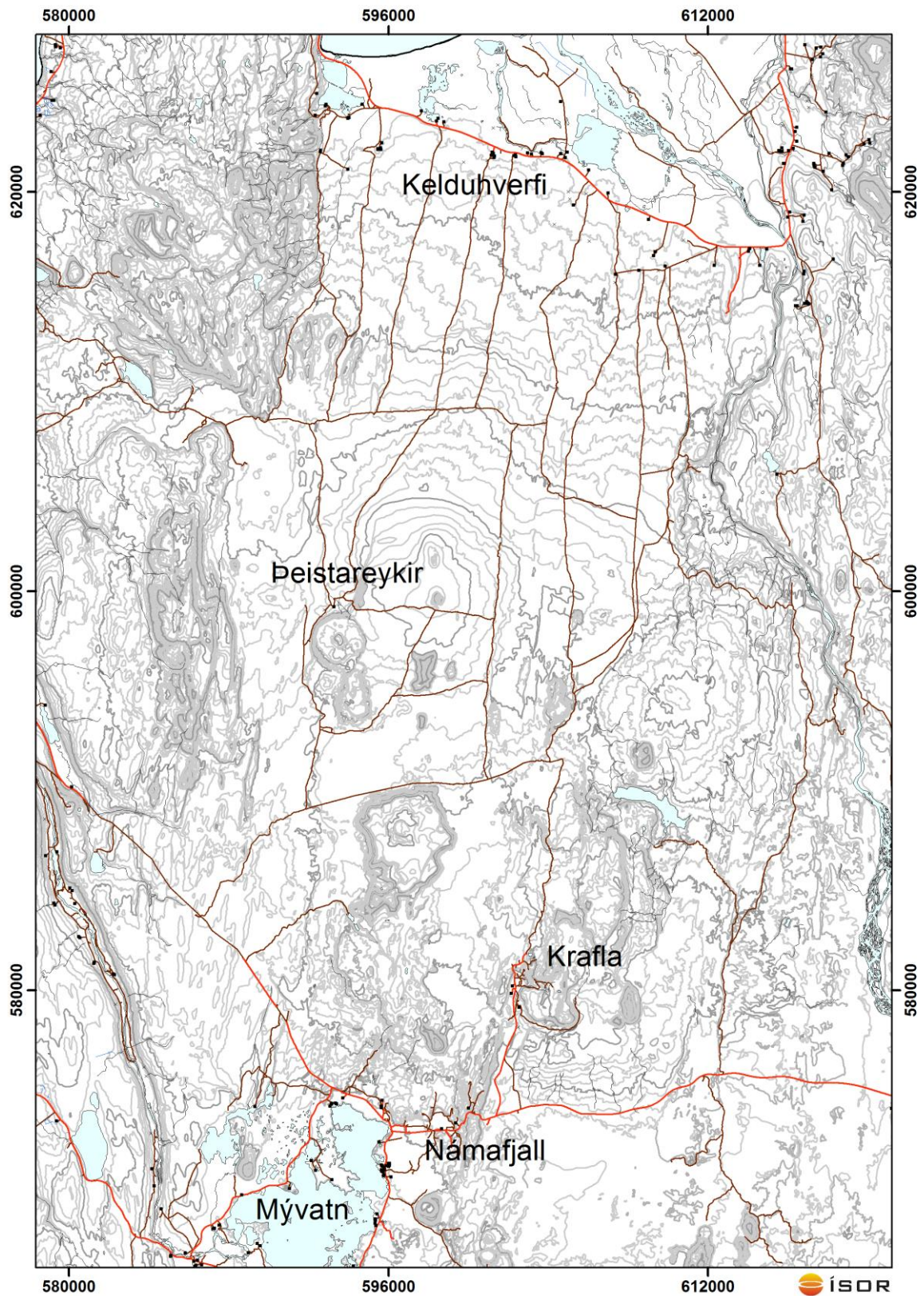
1 Inngangur

Í þessari skýrslu er greint frá athugunum á yfirborðsvirkni jarðhitans á Þeistareykjum og vöktun grunnvatns í Mývatnssveit og Kelduhverfi á árinu 2020 (mynd 1). Niðurstöður ársins eru bornar saman við eldri athuganir á svæðunum sem ná mislangt aftur í tímann eftir atvikum; ýmist ár eða áratugi.

Tilgangurinn með rannsóknum á yfirborðsvirkni er að kortleggja virknina og fylgjast með þeim breytingum sem hafa orðið á jarðhitavirkni á svæðinu undanfarin ár hvort heldur sem er af náttúrulegum orsökum eða af völdum jarðhitanytingar. Árin 2012–2018 var fyrirkomulag vöktunar á yfirborðsvirkni á háhitasvæðum á Norðausturlandi í nokkuð föstum skorðum en þá voru ítarlegar athuganir, m.a. kortlagning jarðhita, sýnataka úr gufuaugum og gasflæðimælingar, gerðar á einu háhitasvæðanna þriggja (Þeistareykjum, Kröflu og Námafjalli) ár hvert en yfirferðin var lauslegri á hinum tveimur svæðunum (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2013a; 2013b; 2014; 2015; 2016; 2017; 2018). Árið 2019 var ekki lögð sérstök áhersla á eitt þessara þriggja svæða heldur umfang eftirlitsins minnkað og að mestu einskorðað við gufusýnatöku. Yfirborðsvirkni var aðeins skoðuð á Þeistareykjum og sjónum aðallega beint að nýlegri virkni á svæðinu við Bæjarfjall og Ketilfjall (Finnbogi Óskarsson o.fl., 2019).

Árið 2020 var athyglinni aftur beint að Þeistareykjum, þar sem dróni (e. UAV) var notað til að taka ljósmyndir og hitamyndir af svæðinu og kortleggja þannig útbreiðslu jarðhitans. Einnig var gasflæði um jarðveg mælt á þétu neti, til samanburðar við eldri mælingar á neti frá 2015 og 2018, og mælingar á línunum árið 2012. Engum gufusýnum var safnað vegna umhverfis-eftirlits árið 2020, og engar athuganir á yfirborðsvirkni fóru fram í Kröflu eða Námafjalli. Hins vegar var einu gufusýni safnað og gasflæðimælingar gerðar í Leirhnjúki í lok ágúst 2020 í leit að ummerkjum um kvikugas vegna landriss nærri Leirhnjúki síðustu ár. Þegar hefur verið gerð grein fyrir niðurstöðum þessara athugana (Finnbogi Óskarsson og Auður Agla Óladóttir, 2020).

Reglubundið eftirlit er haft með efnasamsetningu grunnvatns í nágrenni jarðhitavirkjana Landsvirkjunar á Norðausturlandi til að kanna áhrif affallsvatns frá virkjununum á grunnvatnið í nágrenni virkjananna. Vöktun á grunnvatni í Mývatnssveit hófst í núverandi mynd árið 2003 og voru sýni lengst af tekin tvisvar á ári, að vori og hausti. Fyrirkomulaginu var breytt árið 2014 og eru sýni nú tekin einu sinni á ári en sýnatökustöðum var á móti fjölgað verulega. Haustið 2020 var vatnssýnum safnað á sextán stöðum í Mývatnssveit. Sams konar árleg vöktun á grunnvatni í Kelduhverfi hefur farið fram frá árinu 2007 en sýnatökustöðum á Þeistareykjum var bætt við árið 2013. Haustið 2020 var fjórum grunnvatnssýnum safnað í Kelduhverfi og fimm á Þeistareykjum.



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

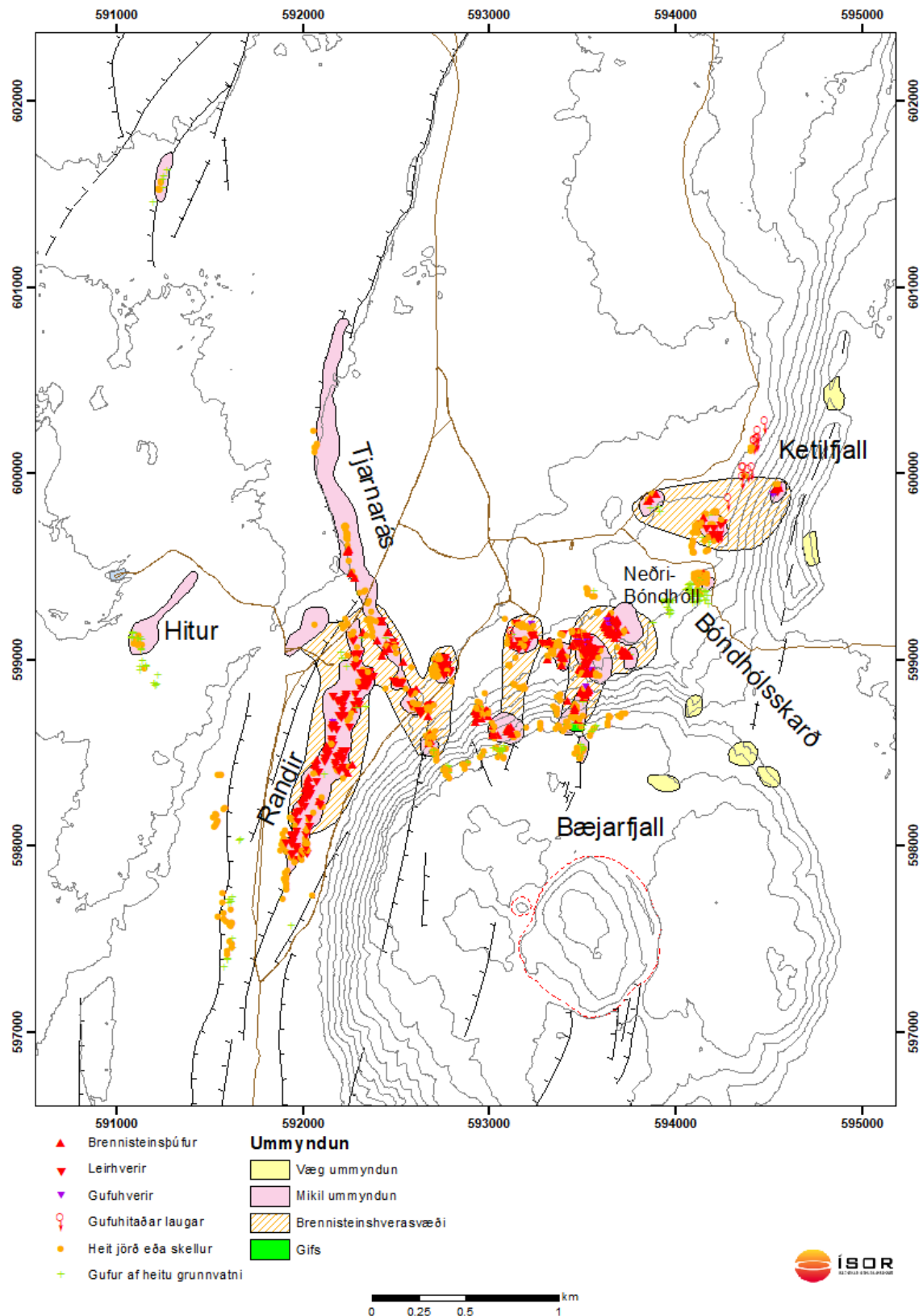
2 Þeistareykir

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. Jarðhitasvæðinu á Þeistareykjum er þar skipt upp í undirsvæðin Hitur, Randir, Tjarnarás, Bæjarfjall og Ketilfjall (mynd 2). Árin 2012, 2015 og 2018 var gerð ítarleg úttekt á yfirborðsvirkninni og teknar hitamyndir og ljósmyndir. Einnig voru þá tekin sýni úr gufuaugum og gerðar gasflæðismælingar (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2013b; 2015, 2018).

Þessum upphaflegu athugunum hefur síðan verið fylgt eftir með árlegri yfirferð um svæðið og niðurstöður bornar saman við úttektina frá 2012 (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2013a; 2014, 2015, 2016, 2017, 2018). Lauslegri athuganir voru gerðar árið 2019 og sjónum var þá aðallega beint að svæðinu neðan Ketilfjalls og norðan Bæjarfjalls en þar hefur ný og aukin jarðhitavirkni komið fram síðan vinnsla hófst á Þeistareykjum (Finnbogi Óskarsson o.fl., 2019).

Árið 2020 var breytt um aðferðafræði við kortlagningu jarðhitans og dróni notaður til að skrásetja útbreiðslu jarðhitavirkinnar, bæði með ljósmyndum og hitamyndum af svæðinu. Einnig voru gasflæðismælingar gerðar á allþéttu mælineti til samanburðar við fyrri mælingar frá 2015 og 2018. Greint verður frá niðurstöðum þessara athugana hér á eftir.

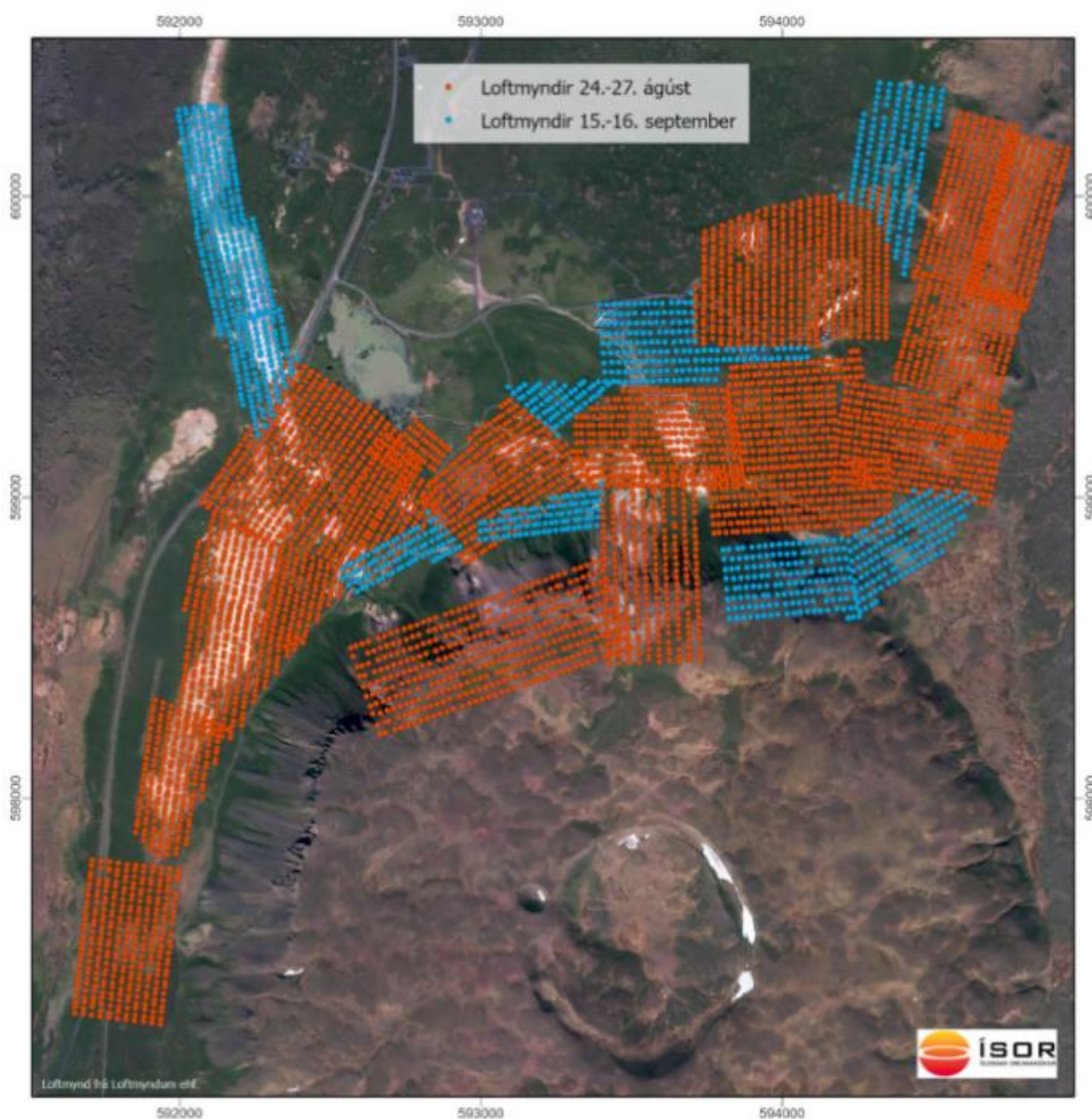


Mynd 2. Jarðhitakort af Þeistareykjum. Ummyndun frá 2007 með kortlagningu yfirborðsvirkni frá 2018 og 2019 (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2019).

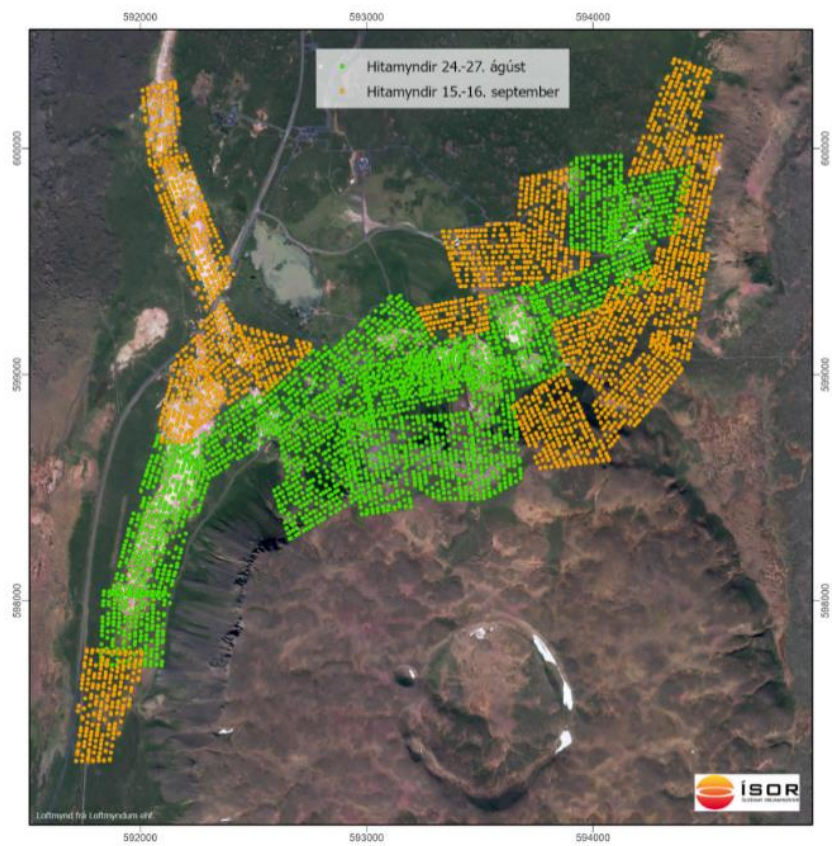
2.2 Kortlagning með dróna 2020

Í stað hefðbundinnar kortlagningar eins og þeirrar sem gerð hefur verið undanfarin ár var ljósmyndum og hitamyndum safnað með dróna árið 2020. Notaður var DJI Matrice 200 dróni ÍSOR og loftljósmyndir voru teknar með Zenmuse X4S myndavél en hitamyndir teknar með Zenmuse XT hitamyndavél. Dagana 24.–27. ágúst og 15.–16. september voru teknar 6447 loftljósmyndir og 6627 hitamyndir á Þeistareykjum. Myndir 3 og 4 sýna staðsetningu myndmiðja þessara mynda.

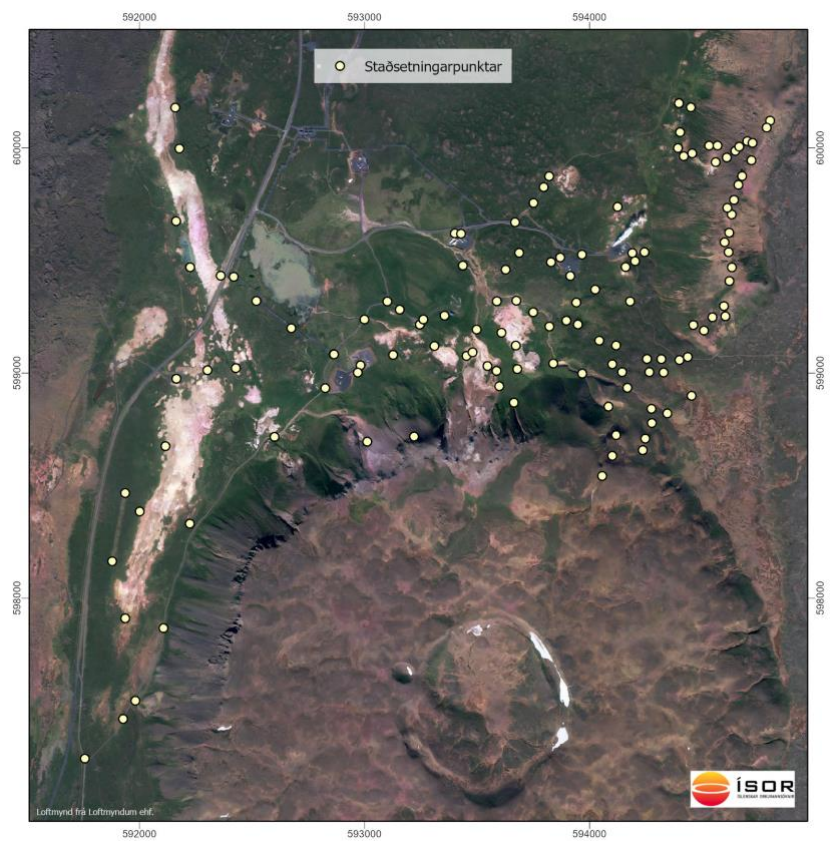
Auk drónamynda var safnað GPS-hnitum með Trimble DA-1 staðsetningartæki með nákvæmni upp á 0,5 m á jörðu niðri af 130 punktum til staðfestingar myndmælipunkta, þ.e. staða sem greina má á myndunum til að staðsetja þær, með mikilli nákvæmni. Myndmælipunktarnir sem voru hnitsettir eru sýndir á mynd 5.



Mynd 3. Staðsetning myndmiðja loftljósmynda.



Mynd 4. Staðsetning myndmiðja hitamynda.

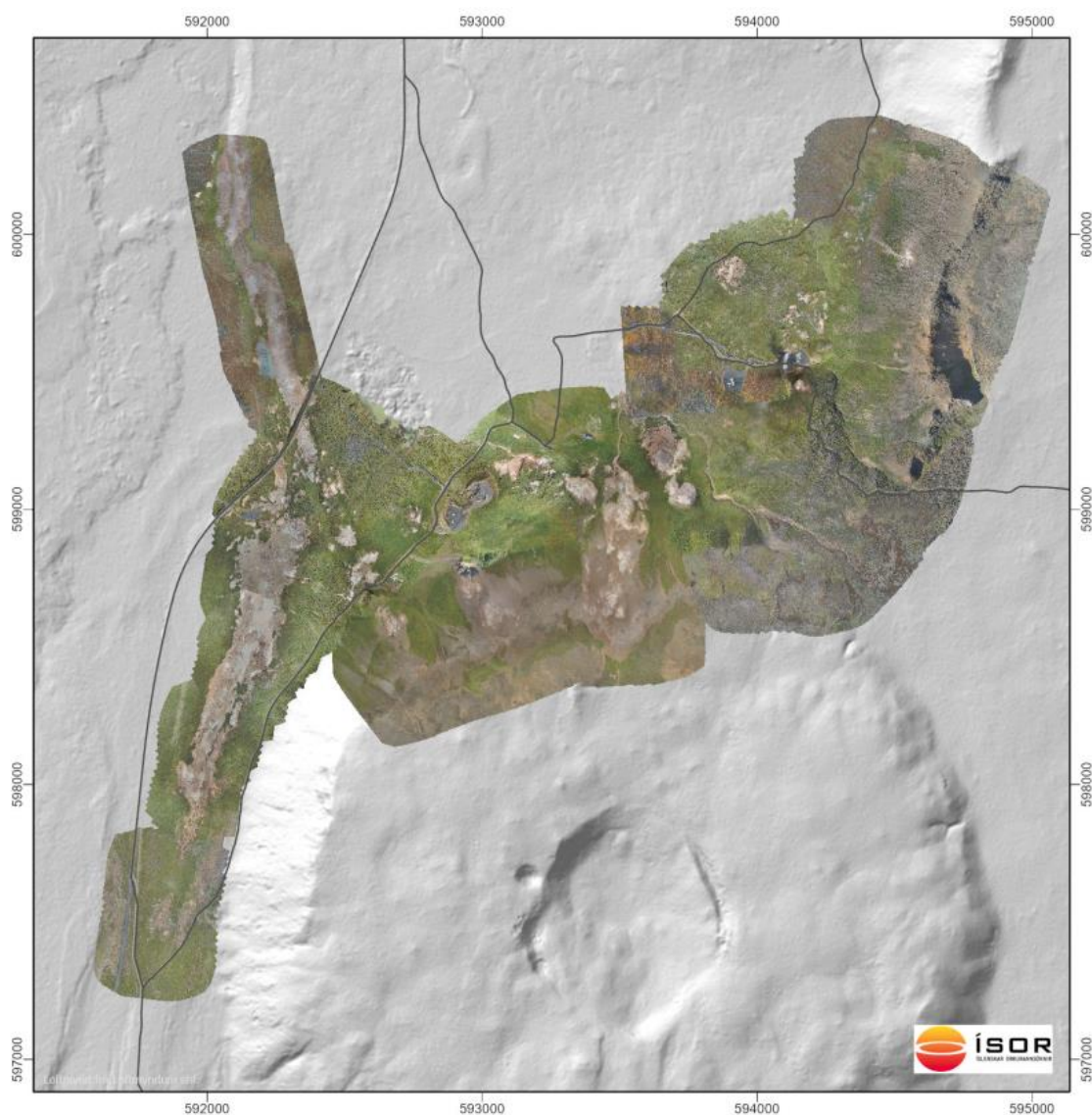


Mynd 5. Staðsetning GPS-viðmiðunarpunkta.

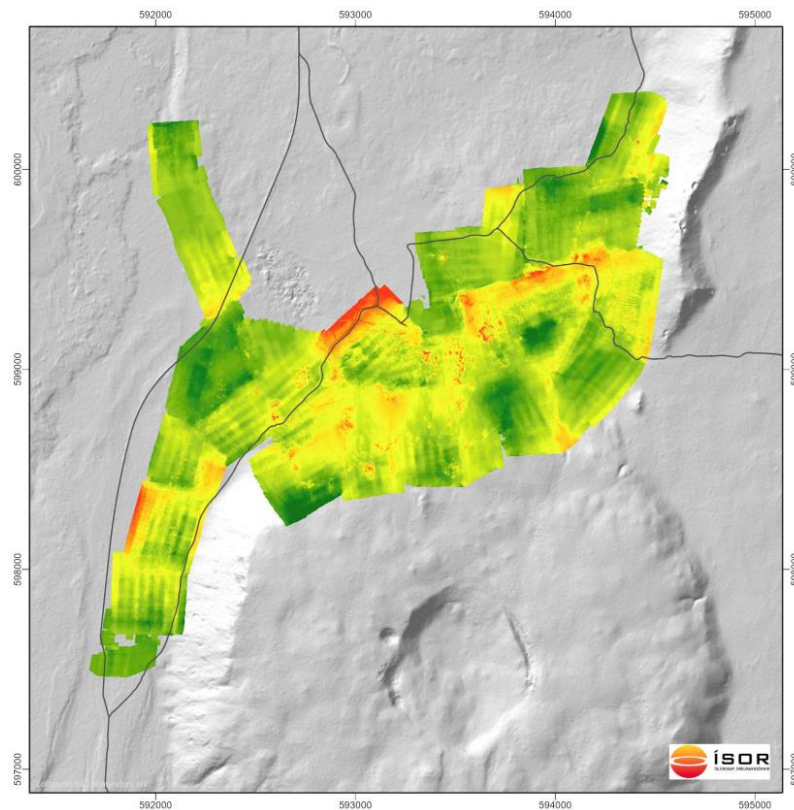
Þessi gögn voru keyrð í gegnum myndmælingarhugbúnaðinn Pix4d og útkoman er loftmyndir af þeim svæðum þar sem þekktan jarðhita er að finna á yfirborði. Pix4d styðst við svokallaðar „Structure from Motion“ myndmælingar sem eru notaðar til að útbúa punktaský, hæðarlíkan og uppréttar myndir hvort heldur sem er loft- eða hitamyndir. Finna má stafræn myndagögn í viðauka 2 sem fylgir þessari skýrslu.

Á myndum 6 og 7 eru sýndar yfirlitsmyndir settar saman úr loftljósmyndum og hitamyndum. Hæðarlíkan af sama svæði var einnig reiknað en myndir til vinnslu þess voru einungis teknar lóðrétt undir drónann. Mynd 8 sýnir hæðarlíkanið.

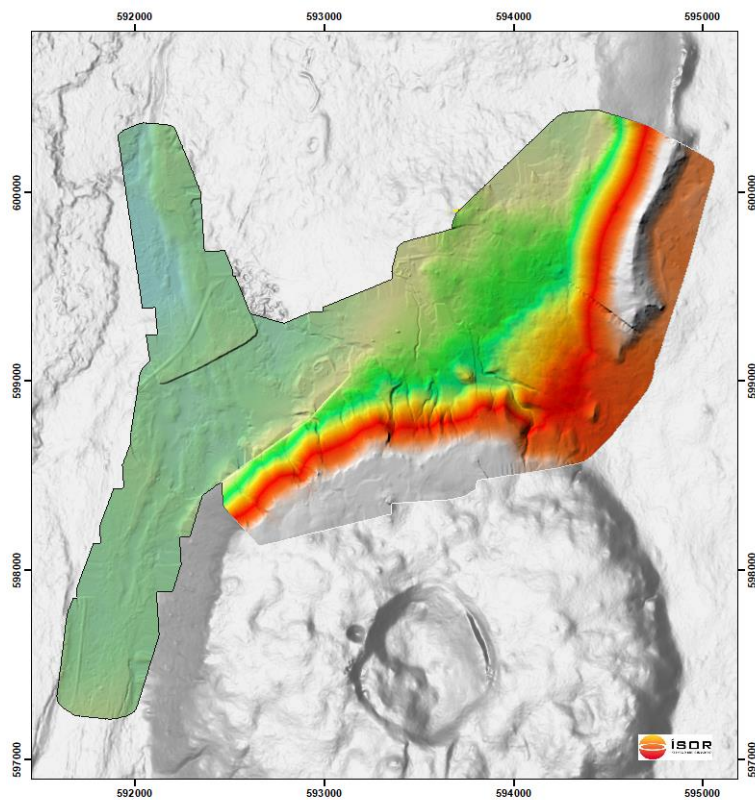
Þegar myndvinnslunni var lokið var unnið áfram með gögnin í ArcGIS þar sem hver punktur á loftmyndunum var sjálfkrafa flokkaður til að draga fram ummynduð svæði og þau svæði sem sýna hæsta hitann.



Mynd 6. Samsett og upprétt loftljósmynd af þekktum virkum jarðhita á Þeistareykjum.



Mynd 7. Samsett hitamynd af virkum jarðhita á Þeistareykjum. Hæðarlíkan Iceland DEM v.1 er undir.



Mynd 8. Samsett hæðarlíkan af virkum jarðhita á Þeistareykjum. Hæðarlíkan Iceland DEM v.1 er undir.

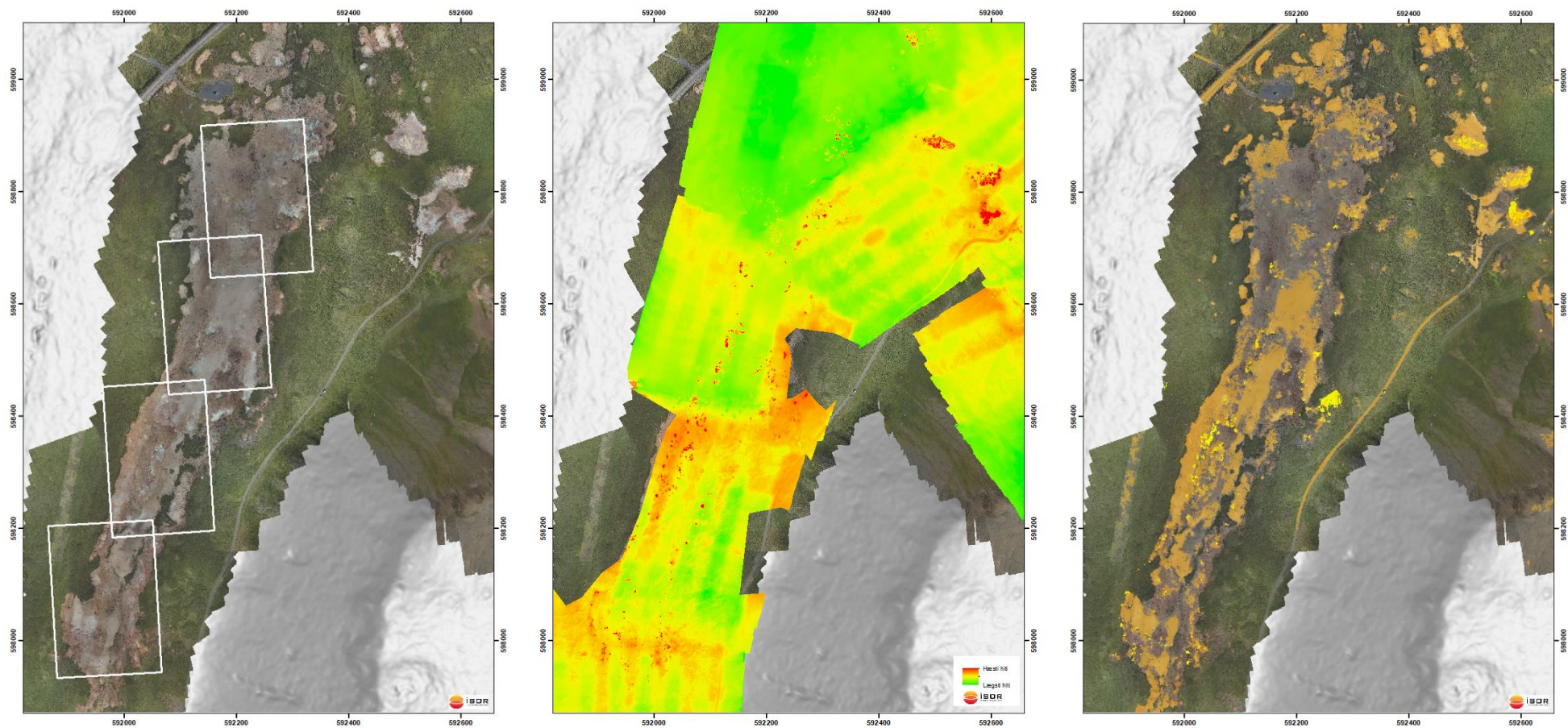
2.2.1 Randir

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 er á misgengi með falli til austurs og myndast smá sigdæld þarna á milli misgengjanna sem þrengist til suðurs. 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 hverapýrpingar með meiri virkni. Hitinn í virkum leir- og brennisteinshverum hefur verið yfir 95°C í flestum tilfellum við mælingar fyrri ára. Frá gufunni er brennisteinslykt en í leirhverunum bullar mismikið. Þeir sem eru í blautari kantinum eru yfirleitt bullandi eða sletta leir. Svæðið var með þurrara móti þegar athuganir fóru þar fram í ágúst 2020. Virkninni er nánar lýst í eldri skýrslum (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2018). Mynd 9 er ljósmynd þar sem horft er í suður eftir jarðhitanum við Randir.

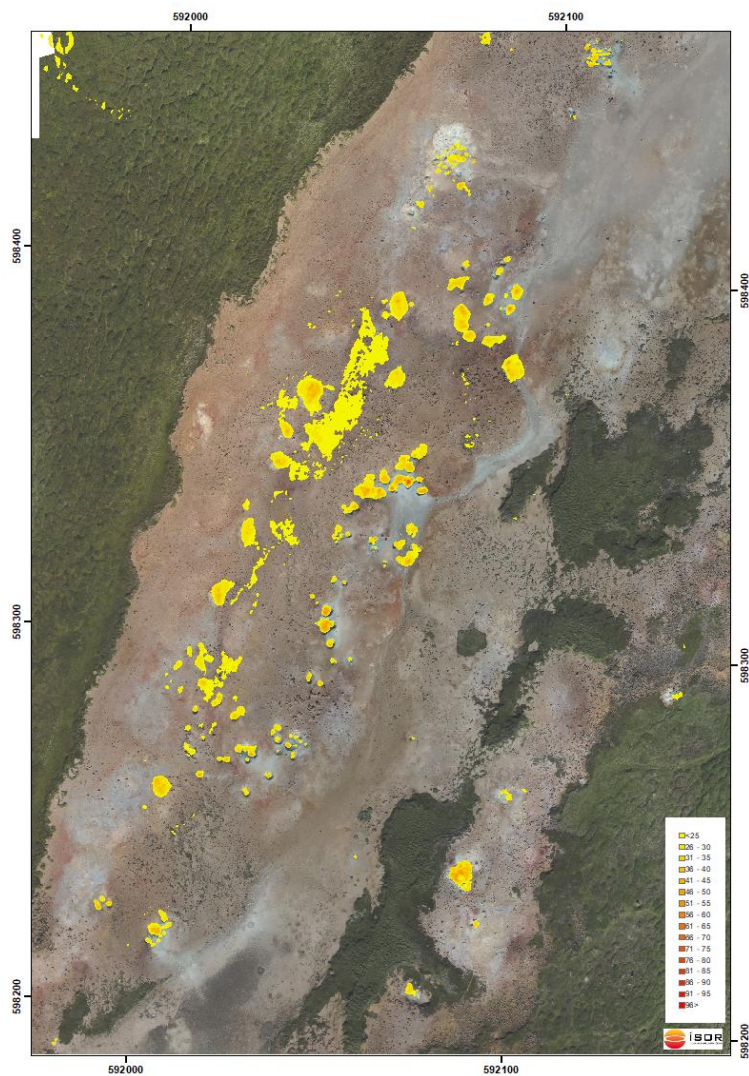
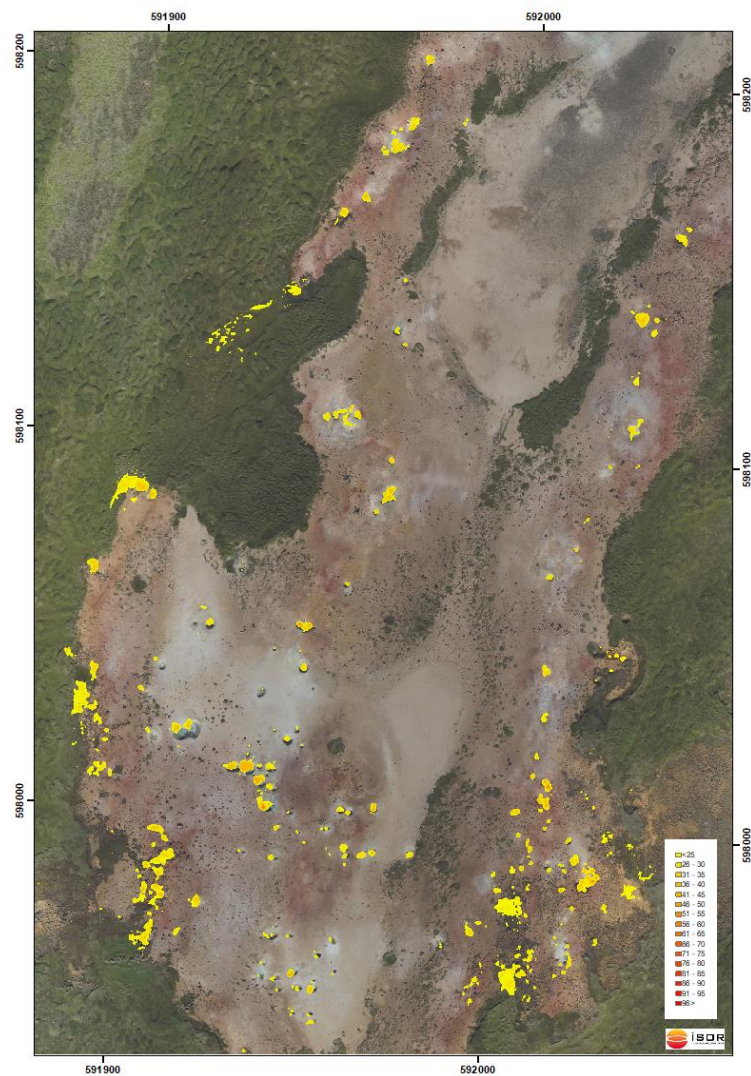
Á mynd 10 er loftmynd, hitamynd og samsett mynd af Röndum. Myndgreiningaraðferðum var beint til að greina ummynduð svæði og er það sýnt á samsettu myndinni (mynd 10). Þar eru einungis þau svæði sýnd þar sem hæst mæligildi sjást á hitamyndum. Þar sem upplausnin í þessum gögnum er mjög há, og hitablettirnir hafa tiltölulega lítið flatarmál, eru nærmyndir af jarðhitavirkninni, sem hver um sig sýnir minna svæði, sýndar á mynd 11. Línur í virkninni koma vel fram á myndunum.



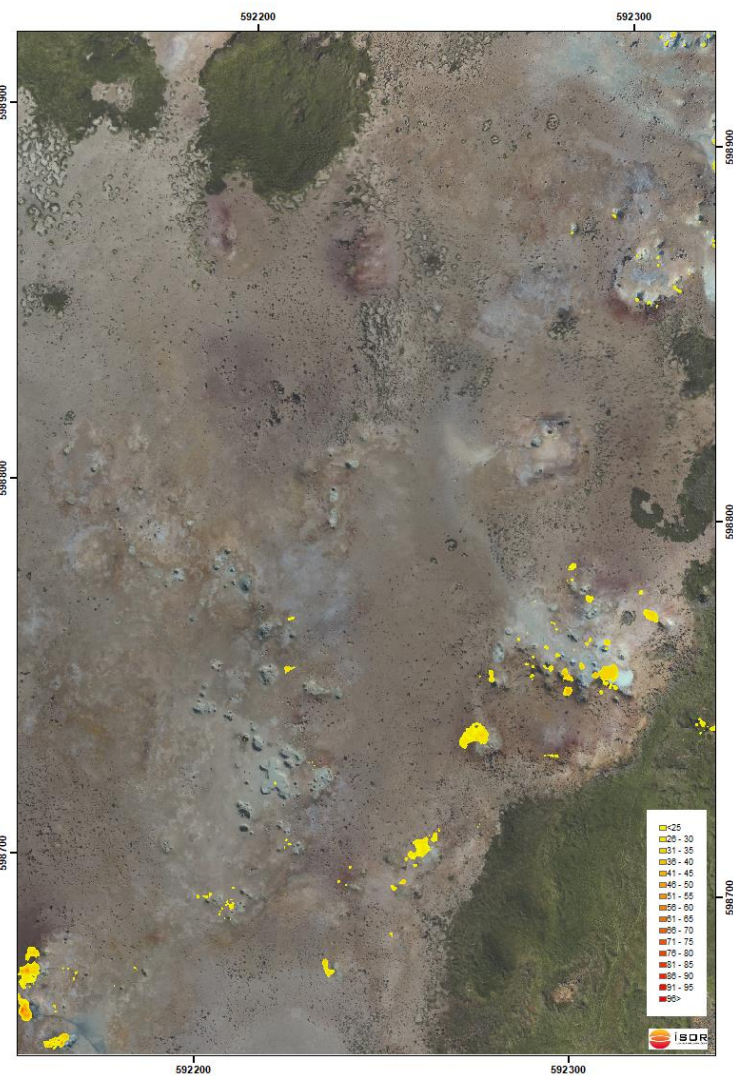
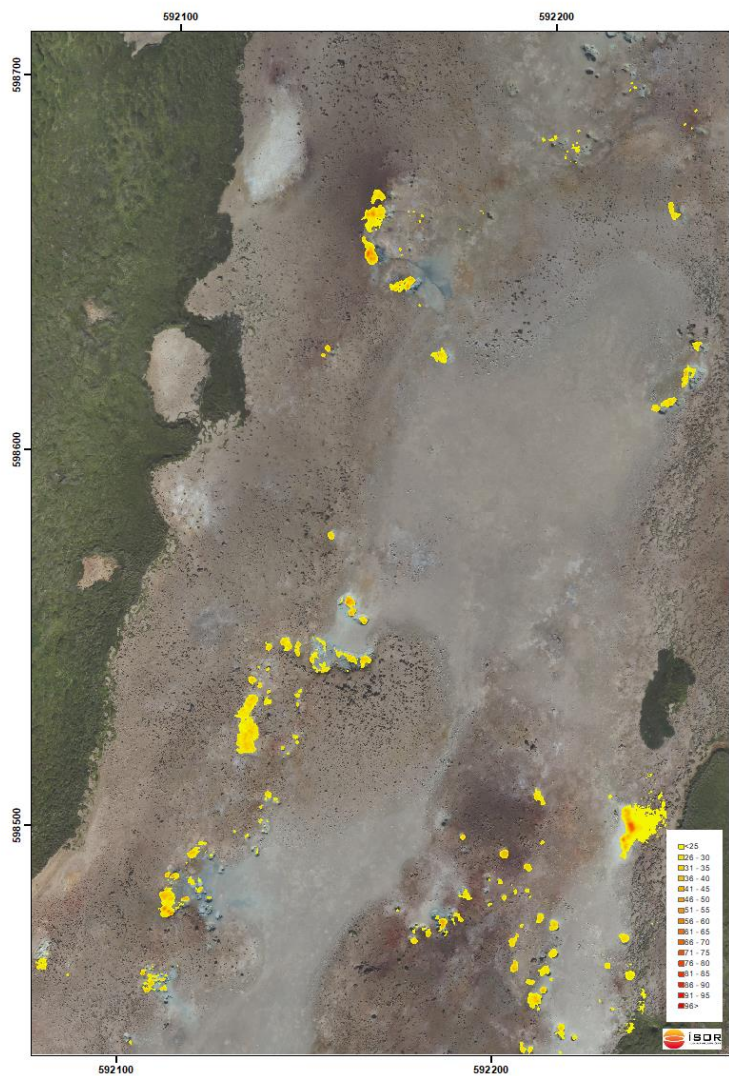
Mynd 9. Flugljósmynd af Röndum. Horft til suðurs.



Mynd 10. Yfirlitsmyndir af Röndum. Frá vinstri til hægri: loftmynd (svæði á mynd 11 merkt), hitamynd og kort sem sýnir ummynduð svæði og jarðhitavirkni.



Mynd 11. Nærmyndir af virkum jarðhita við Randir. Grunnurinn er loftmynd en ofan á hana er lögð hitamynd sem sýnir afstæðan hita á bilinu 25 (gult) til 100 (rautt). Myndirnar eru í röð, syðsta fyrst en færast svo norður.



Mynd 11. (Frh.). Nærmyndir af virkum jarðhita við Randir. Grunnurinn er loftmynd en ofan á hana er lögð hitamynd sem sýnir afstæðan hita á bilinu 25 (gult) til 100 (rautt). Myndirnar eru í röð, syðsta fyrst en færast svo norðar.

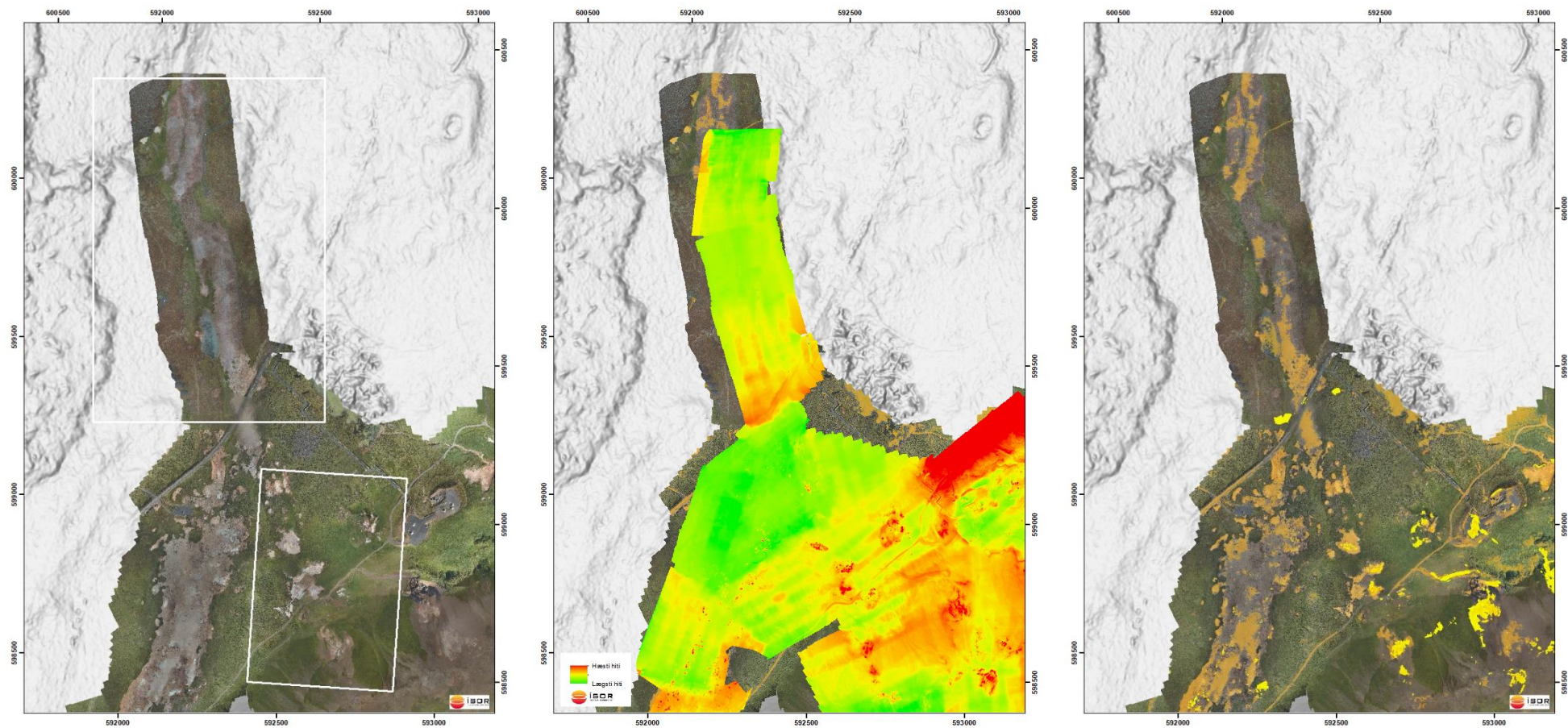
2.2.2 Tjarnarás

Virknin í Tjarnarási tengist sveigðu misgengi sem stefnir frá Bæjarfalli til NNV en sveigir svo til norðurs og norðausturs. Virknin er mest næst Bæjarfalli og nær upp í miðjar hlíðar þess. Í fyrri skýrslum er jarðhitnum við Tjarnarás lýst nánar (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2018). Ljósmynd sem tekin er af Bæjarfjalli eftir Tjarnarási til NNV (mynd 12) sýnir vel ummyndun tengda misgenginu en hún einkennist af ljósum og rauðum leir.

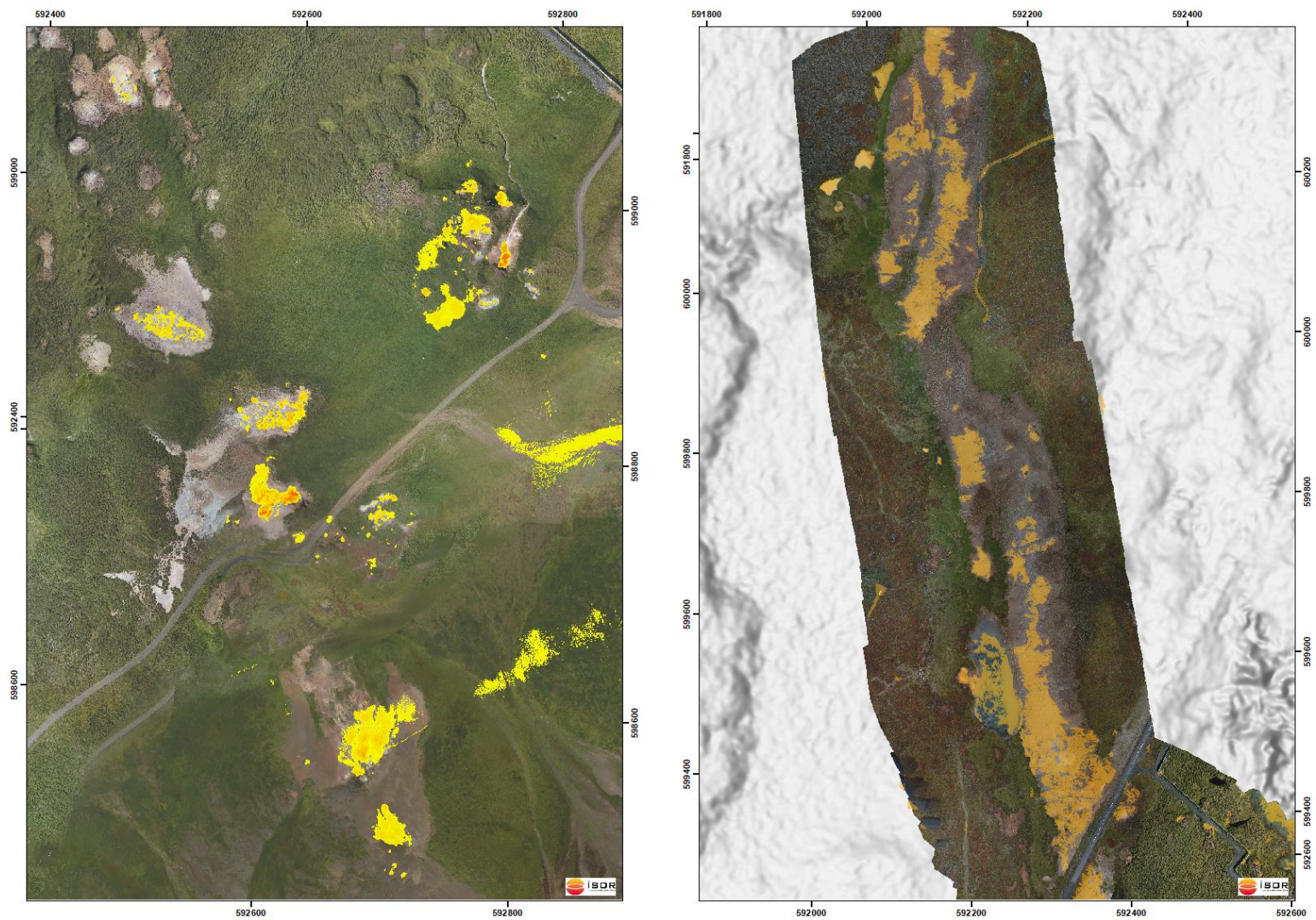


Mynd 12. Loftmynd. Horft eftir Tjarnarási til NNV.

Nyrsti hluti Tjarnaráss sýnir ekki jarðhitavirkni, þótt þar sé veruleg köld ummyndun, eins og kemur glögg fram á hitamyndunum. Meiri virkni nær Bæjarfjalli er einnig greinileg á hitamyndum. Mynd 13 sýnir myndagögn af Tjarnarási en á mynd 14 eru sýndar nærmyndir af jarðhitnum syðst í Tjarnarási upp við Bæjarfjall og af norðurhluta svæðisins.



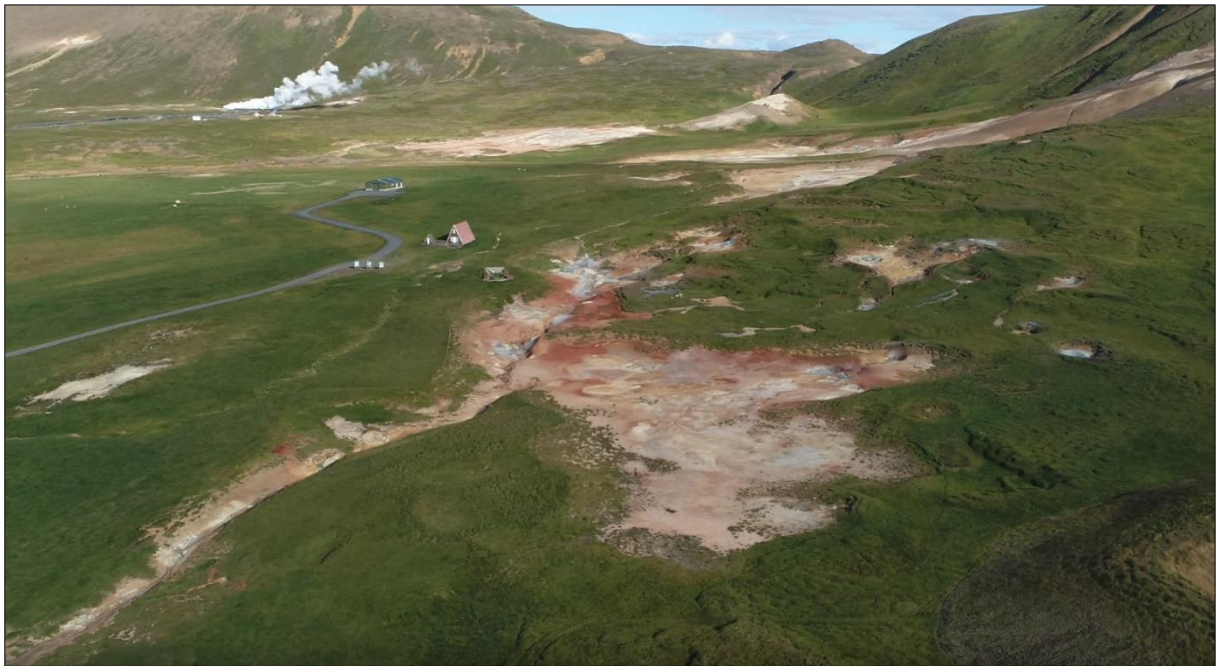
Mynd 13. Yfirlitsmyndir af Tjarnarási. Frá vinstri til hægri: loftmynd (svæði á mynd 14 merkt), hitamynd og kort sem sýnir ummynduð (brúnleit) svæði og jarðhitavirkni.



Mynd 14. Nærmyndir af virkum jarðhita í Tjarnarási. A) Virkni í Tjarnarási upp við Bæjarfjall. Grunnurinn er loftmynd en ofan á hana er lögð hitamynd sem sýnir afstæðan hita á bilinu 25 (gult) til 100 (rautt). B) Ummynduð svæði á norðurhluta Tjarnaráss.

2.2.3 Bæjarfjall

Í fyrri skýrslum um umhverfiseftirlit (Sigurður G. Kristinnsson o.fl., 2018) er jarðhitinum við Bæjarfjall lýst. Skipta má virkninni upp í nokkur afmörkuð svæði en mest allur jarðhitinn liggur þó á milli tveggja misgengja með N-S læga stefnu sem mynda sigdal í toppi fjallsins og teygja sig niður norðurhlíð fjallsins og út Þeistareykjagrundir. 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). Ljósmyndirnar hér að neðan (myndir 15 og 16) sýna jarðhitavirknina.

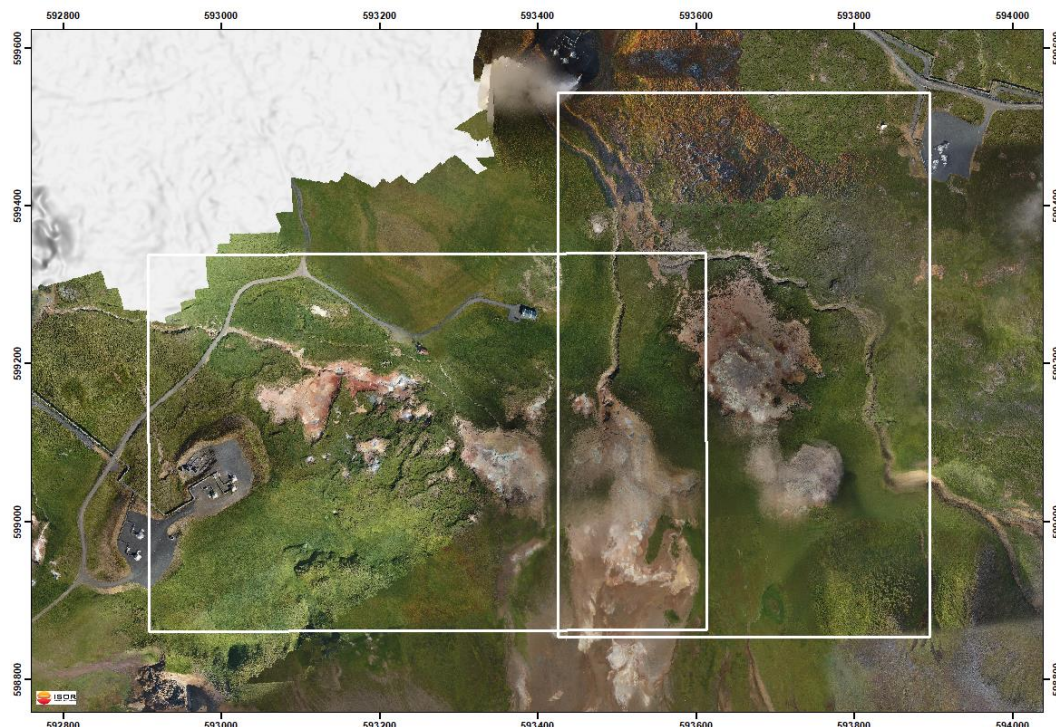


Mynd 15. Flugljósmynd sem sýnir virka jarðhitann við sæluhúsið. Horft til norðausturs.

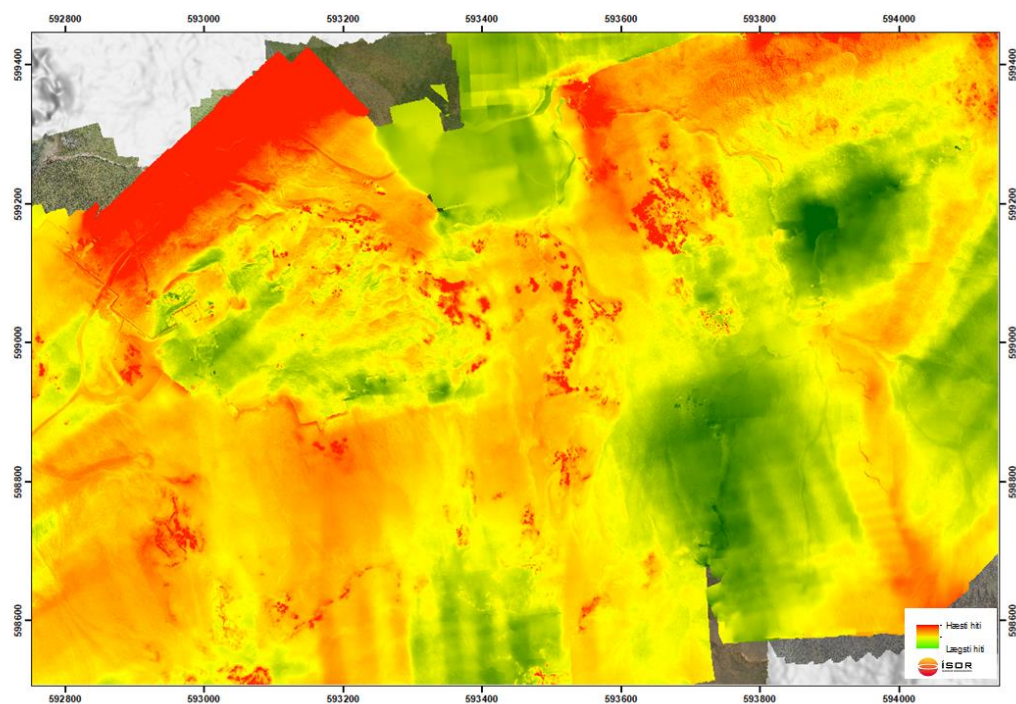


Mynd 16. Flugljósmynd sem sýnir jarðhitavirkni við Bæjarfjall. Horft til suðurs.

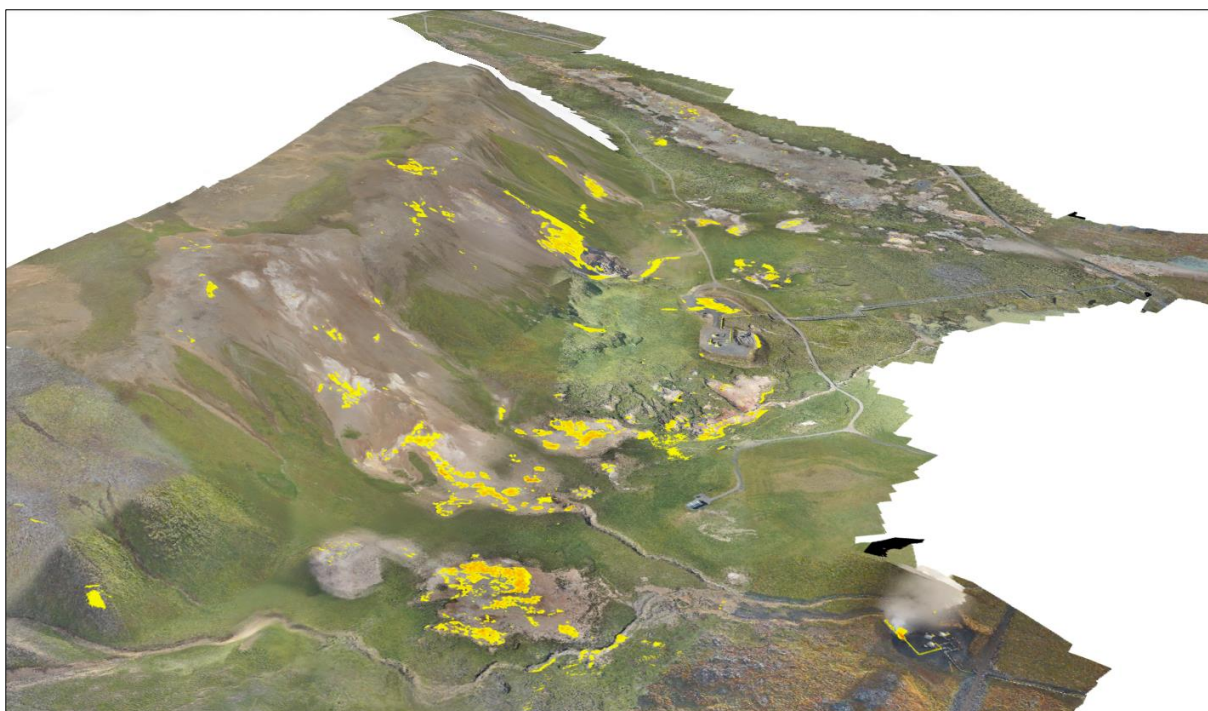
Kortin á næstu myndum (myndir 17 til 21) sýna jarðhitann við Bæjarfjall eins og hann kemur fram á loftmyndum og hitamyndum. Rauða svæðið á norðvesturhluta myndar 18 er ekki raunverulegt hitafrávik heldur eru hitamyndir þar af einhverjum ástæðum einsleitar. Það getur til dæmis stafað af gufu í andrúmslofti, inngeislun sólar eða óvenju miklum titringi drónans.



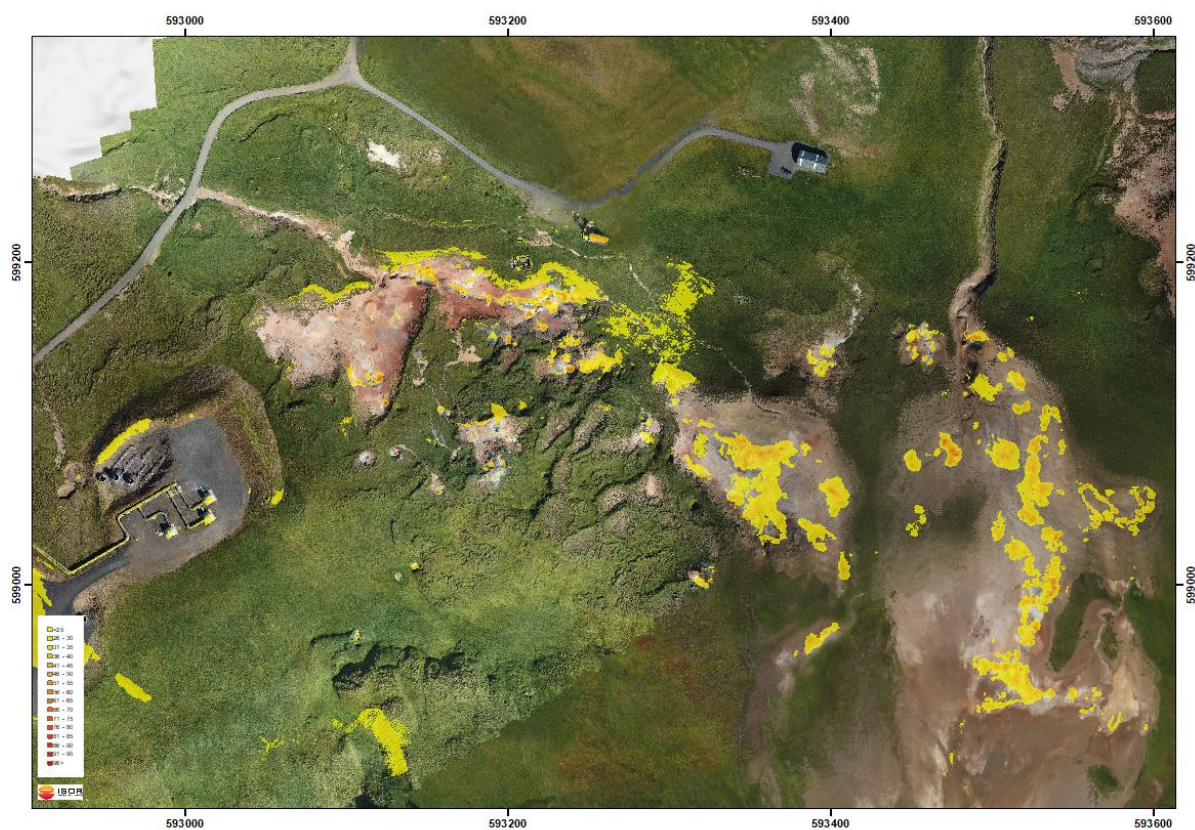
Mynd 17. Myndkort sem sýnir jarðhitasvæðið við Bæjarfjall.



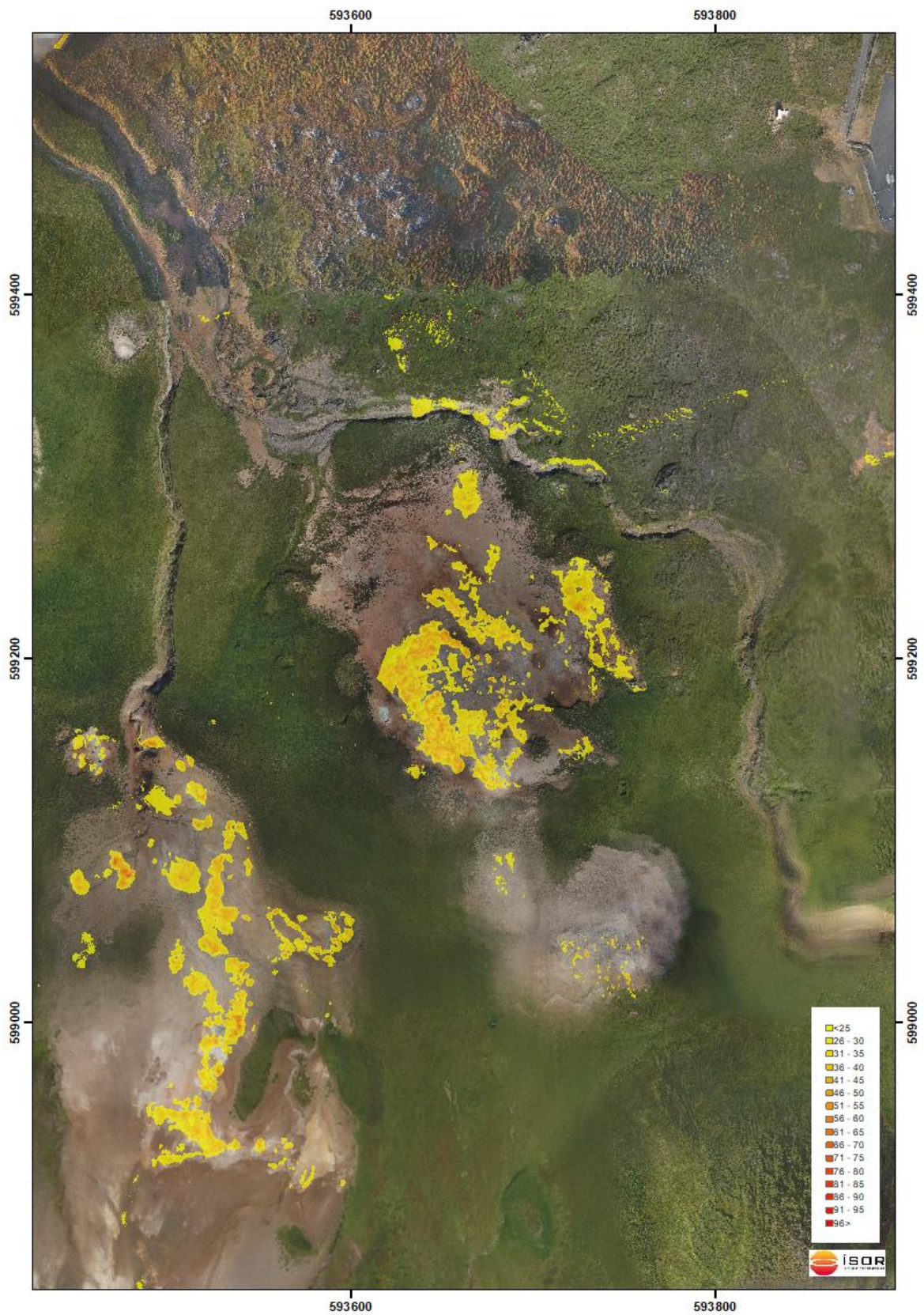
Mynd 18. Hitamynd af jarðhitasvæðinu við Bæjarfjall.



Mynd 19. Þrívíð samsett mynd sem sýnir loftmynd og hitastig við Bæjarfjall. Afstæður litaskali er frá gulum (25°C) upp í rauðan (>90°C).



Mynd 20. Nærmyndir af virkum jarðhita við Bæjarfjall. Afstæður litaskali er frá gulum (25°C) upp í rauðan (>90°C).



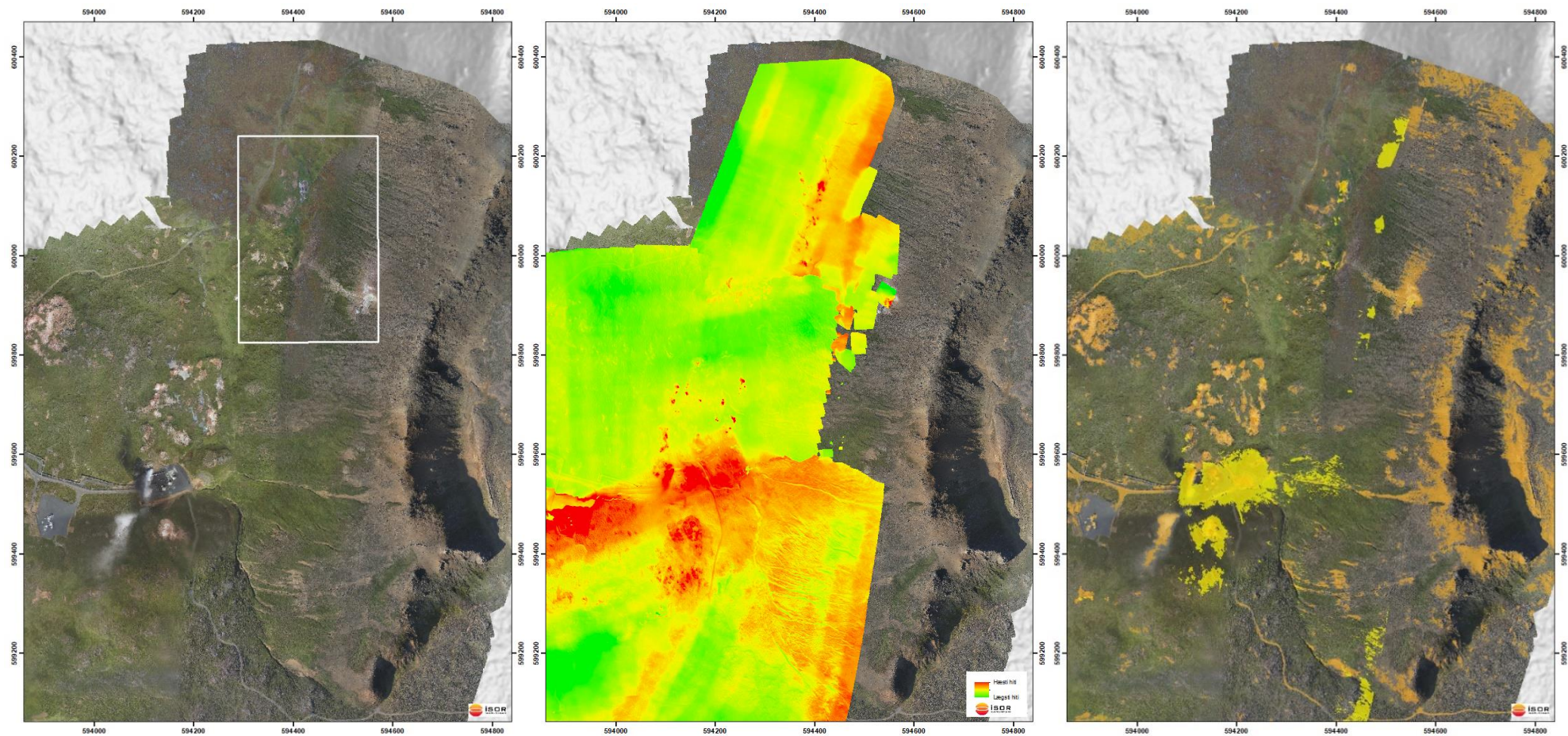
Mynd 21. Nærmyndir af virkum jarðhita við Bæjarfjall og Bóndhól. Afstæður litaskali er frá gulum (25°C) upp í rauðan (>90°C).

2.2.4 Ketilfjall

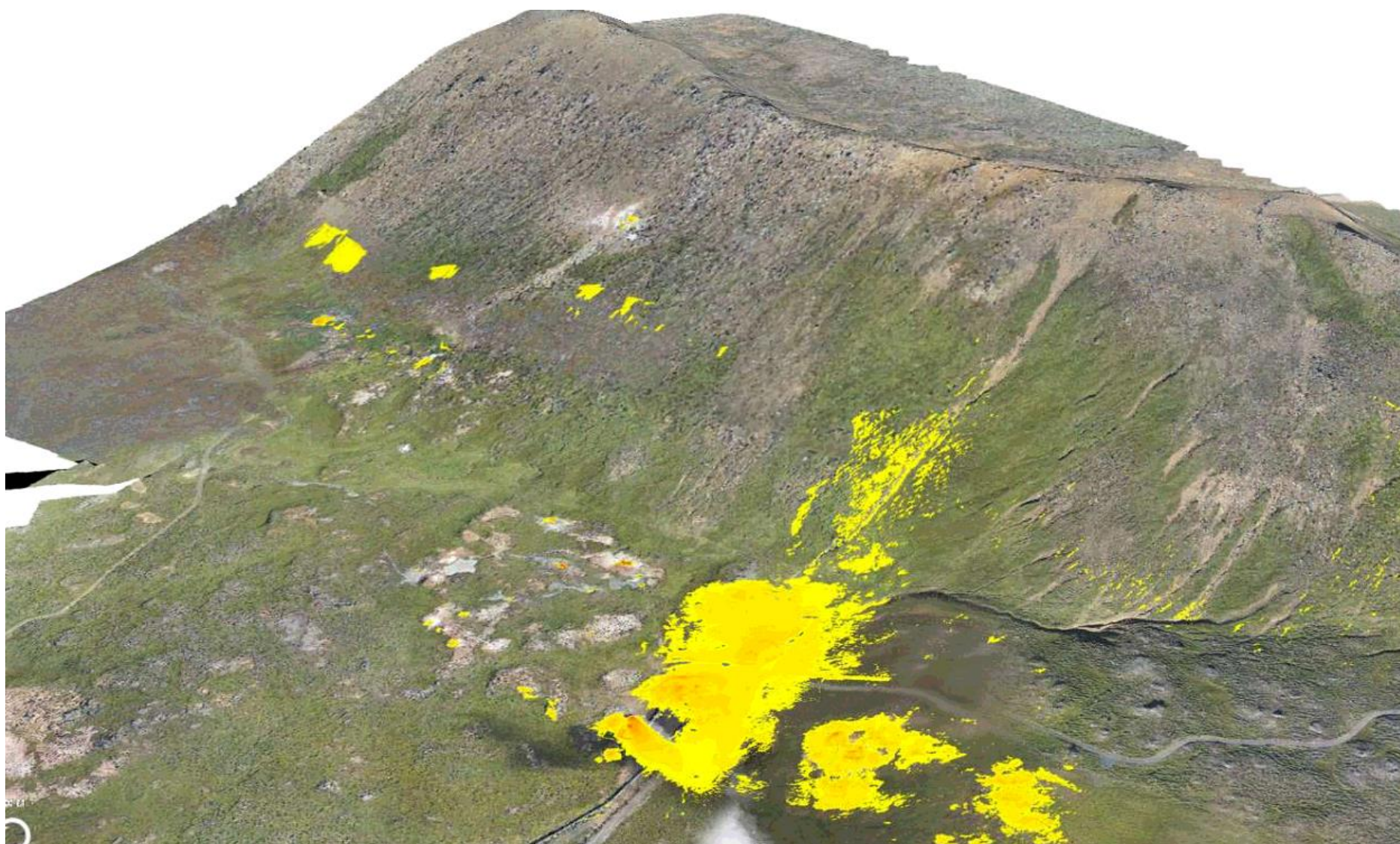
Hér verður stiklað á stóru um jarðhitavirkni í og við rætur Ketilfjalls en nánari lýsingu er að finna í eldri skýrslum (t.d. Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2018).

Vestan undir Ketilfjalli eru volgar laugar sem eru afrennsli upphitaðs grunnvatns frá hitagjafa undir fjallinu. 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 en fór mest í 37°C árið 2014. Uppi í miðjum vesturhliðum Ketilfjalls er mest áberandi jarðhitastaðurinn, sjálfur Ketillinn. Þar eru bæði gufu- og leirhverir og brennisteinsþúfur á 30x10 m stóru svæði. Nokkurt gufustreymi er á þessum stað, bæði frá gufuaugum og brennisteinsþúfum, og er hiti >95°C. Jarðhiti er bæði 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 farið vaxandi undanfarin ár og hafa bæst við nýjar, heitar skellur og niðurföll, eins og greint var frá í fyrri skýrslum (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2018; Finnbogi Óskarsson o.fl., 2019). Sunnan við borteiginn hefur jarðhitavirkni einnig aukist talsvert undanfarin ár. Þar sem einu sinni var kalt, gróið hraun kom fram lyktarlaus vatnsgufa (<70°C) sem leið upp í gegnum hraunið, og flekkir af deyjandi mosa og öðrum gróðri. Síðustu ár hafa þar myndast litlir sjóðandi leirpyttir og er sums staðar brennisteinslykt af gufunni.

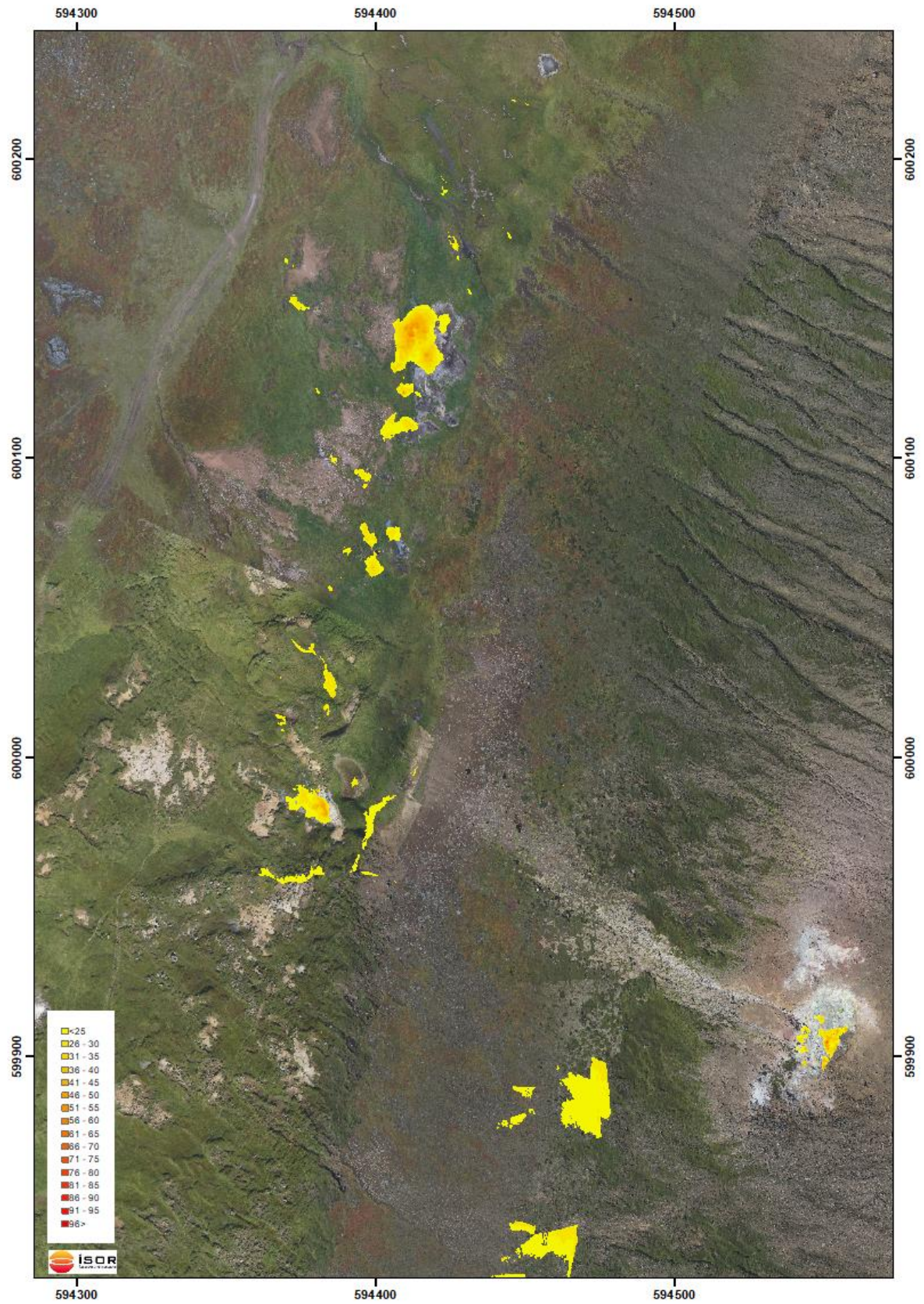
Mynd 22 sýnir loftmynd og hitamynd af sunnanverðu Ketilfjalli og svæðinu þar vestan við. Kortin á næstu myndum (myndir 23 og 24) sýna jarðhitann við Ketilfjall eins og hann kemur fram á loftmyndum og hitamyndum. Heitasti flekkurinn á mynd 23 er borteigur ÞG-3, ÞG-6 og ÞG-7. Myndir 22 og 23 sýna glögglega hvernig jarðhitinn er farinn að breiðast til suðurs frá borteignum og teygja sig upp hraunstrauminn í Bóndhólsskarði.



Mynd 22. Yfirlitsmyndir af Ketilfjalli. Frá vinstri til hægri: loftmynd, hitamynd og kort sem sýnir ummynduð svæði og jarðhitavirkni.



Mynd 23. Þrívíð samsett mynd sem sýnir loftmynd og hitastig við Ketilfjall og neðanvert Bóndhólsskarð. Afstæður litaskali er frá gulum (25°C) upp í rauðan (100°C). Heitasti flöturinn er borteigur holna ÞG-3, ÞG-6 og ÞG-7.



Mynd 24. Nærmyndir af virkum jarðhita við Bæjarfjall. Afstæður litaskali er frá gulum (25°C) upp í rauðan (100°C).

2.2.5 Samanburður við eldri gögn

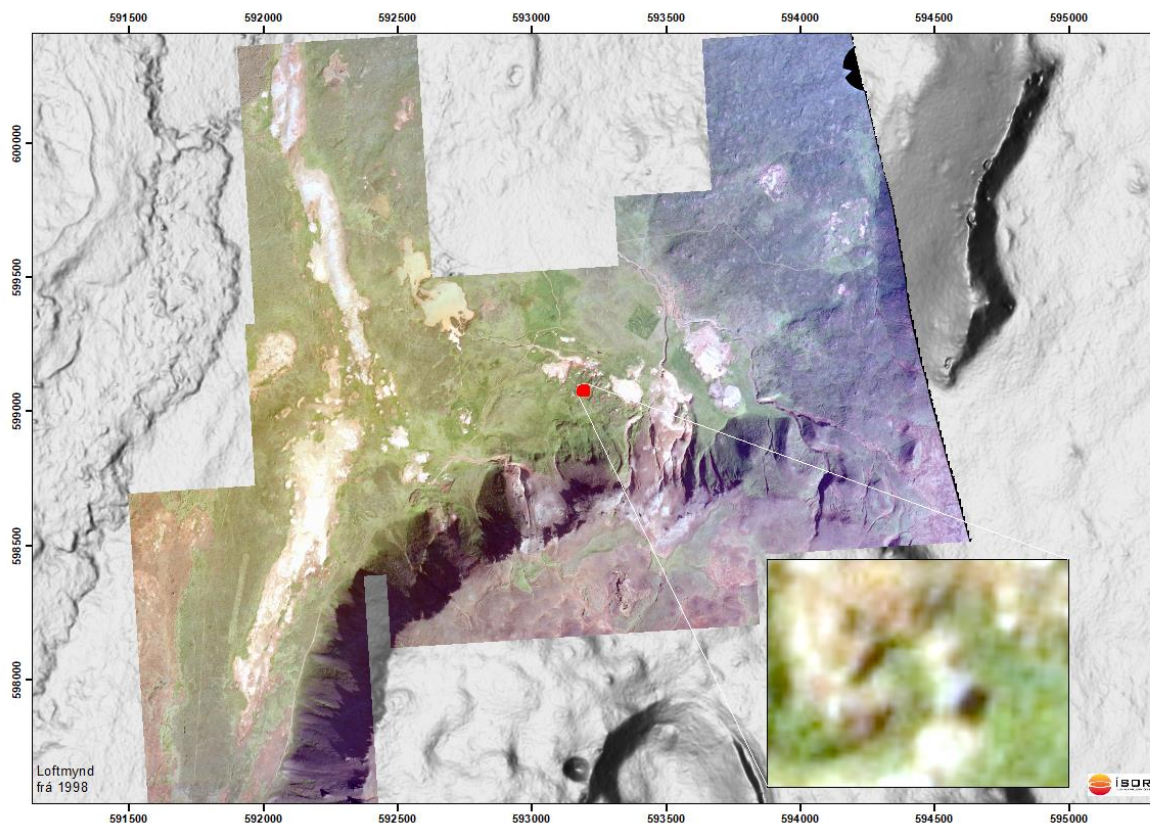
Yfirborðsvirki jarðhitans á Þeistareykjum hefur verið vel kortlögð á undanförunum árum. Aðferðin sem beitt hefur verið byggist á yfirferð jarðfræðings í mörkinni og samanburði á niðurstöðum kortlagningar milli ára og hitamyndum sem teknar hafa verið á jörðu.

Hér er annarri aðferð beitt. Í stað hefðbundinnar kortlagningar var dróni notaður til að afla myndgagna sem lýst er í kafla 2.2. Þetta eru alls ekki fyrstu loftmyndir sem til eru af Þeistareykjum en í safni ÍSOR eru til myndir frá 1998, 2007 og 2014. Hér eru gögnin frá 2020 borin saman við þessi gögn auk þess að samanburður er gerður við kortlögð gögn frá fyrri árum. Tafla 1 sýnir yfirlit þeirra loftmyndagagna sem hér eru skoðuð.

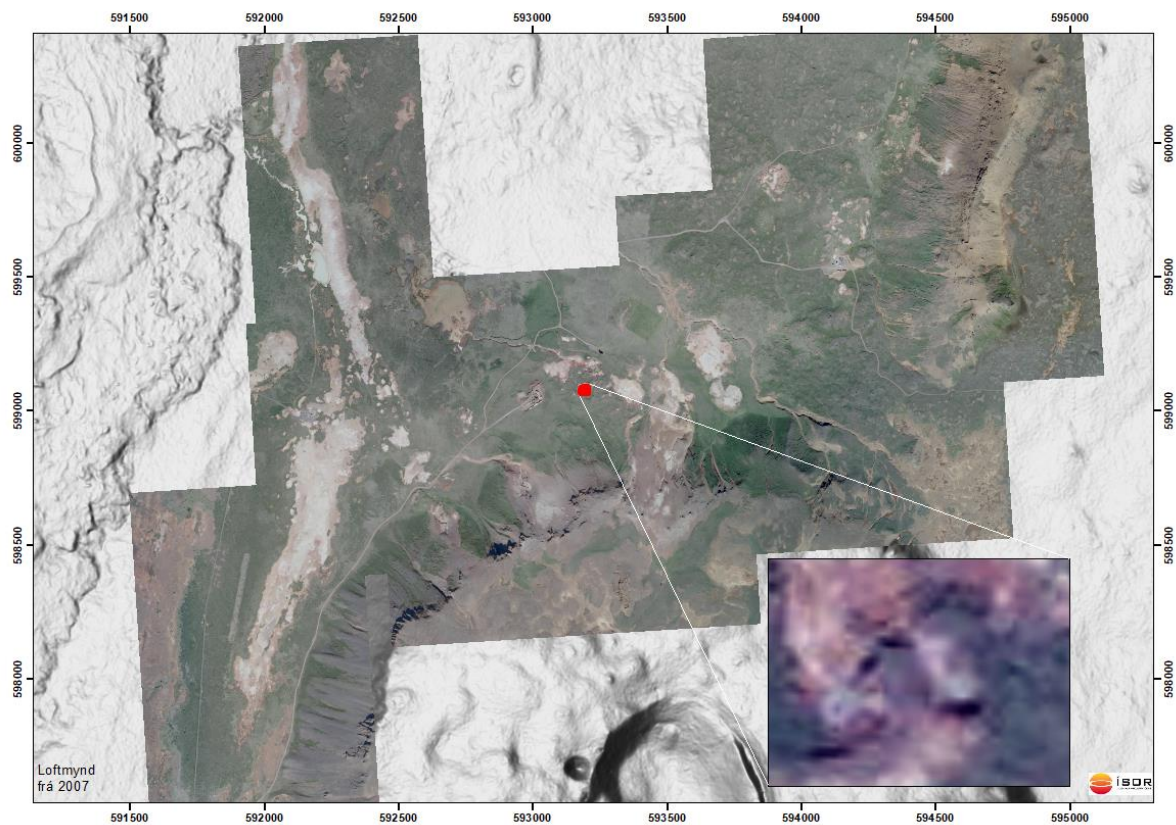
Tafla 1. Loftmyndagögn sem skoðuð voru til samanburðar.

Loftmyndir	Uppruni gagna	Ár	Greinihæfni
theistareykir_1998	Loftmyndir ehf.	1998	0,5 m
theistareykir_2007	Loftmyndir ehf.	2007	0,5 m
theistareykir_2014	Loftmyndir ehf.	2015	0,2 m
ISOR droni 2020	ÍSOR	2020	0,029 m

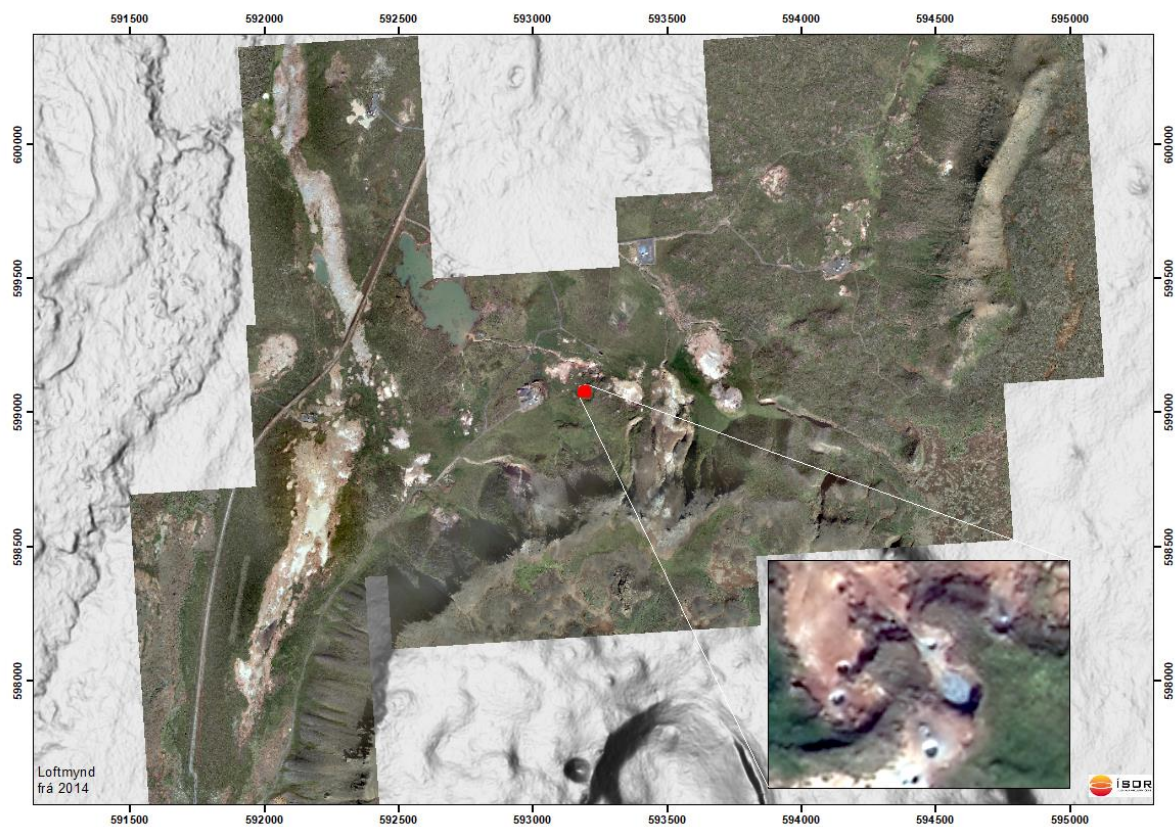
Þessar myndir sýna misjafnlega stór svæði eftir árum og því eru myndirnar klipptar til að auðvelda samanburð. Þar sem drónamyndirnar taka til minnsta svæðisins er það notað sem viðmið. Augljós mismunur er á myndum 25–28 og greiningarhæfnin eykst verulega milli ára líkt og sjá má á innfeldu myndinni á hverri mynd fyrir sig.



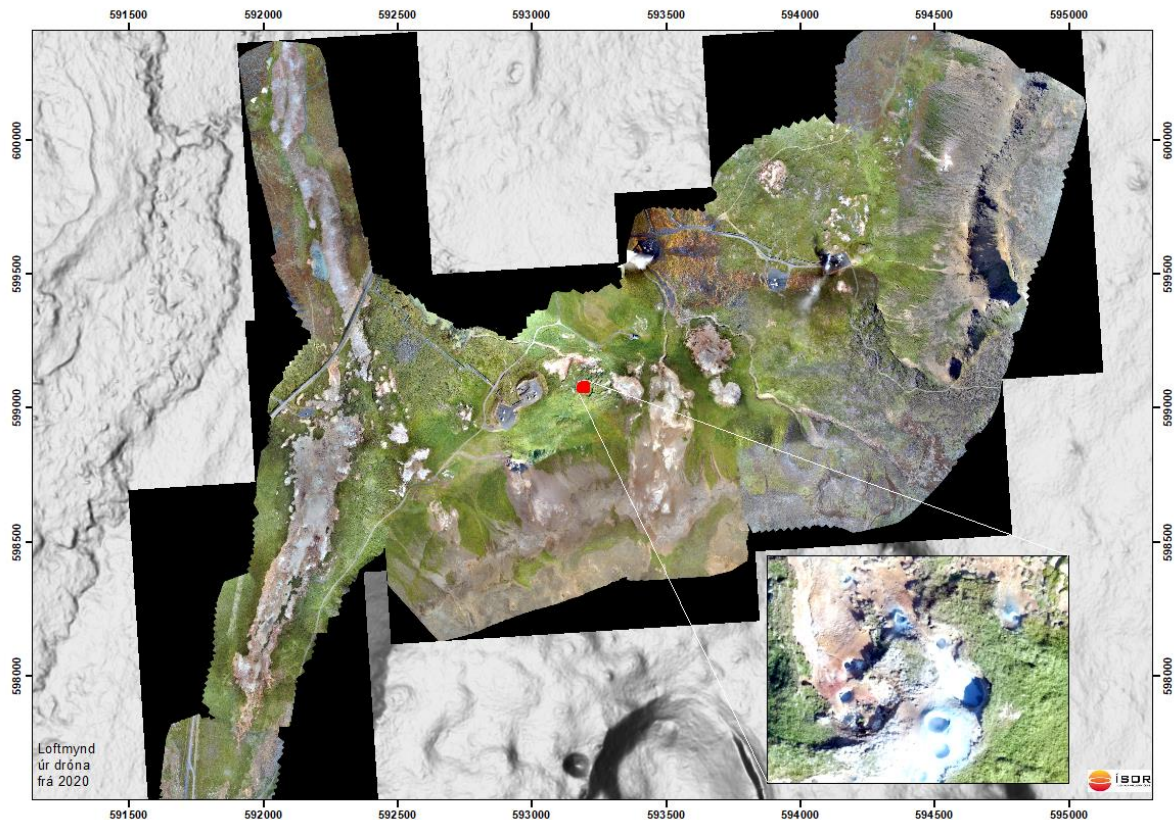
Mynd 25. Loftmynd frá 1998 af jarðhitasvæðinu á Þeistareykjum.



Mynd 26. Loftmynd frá 2007 af jarðhitasvæðinu á Peistareykjum.



Mynd 27. Loftmynd frá 2014 af jarðhitasvæðinu á Peistareykjum.

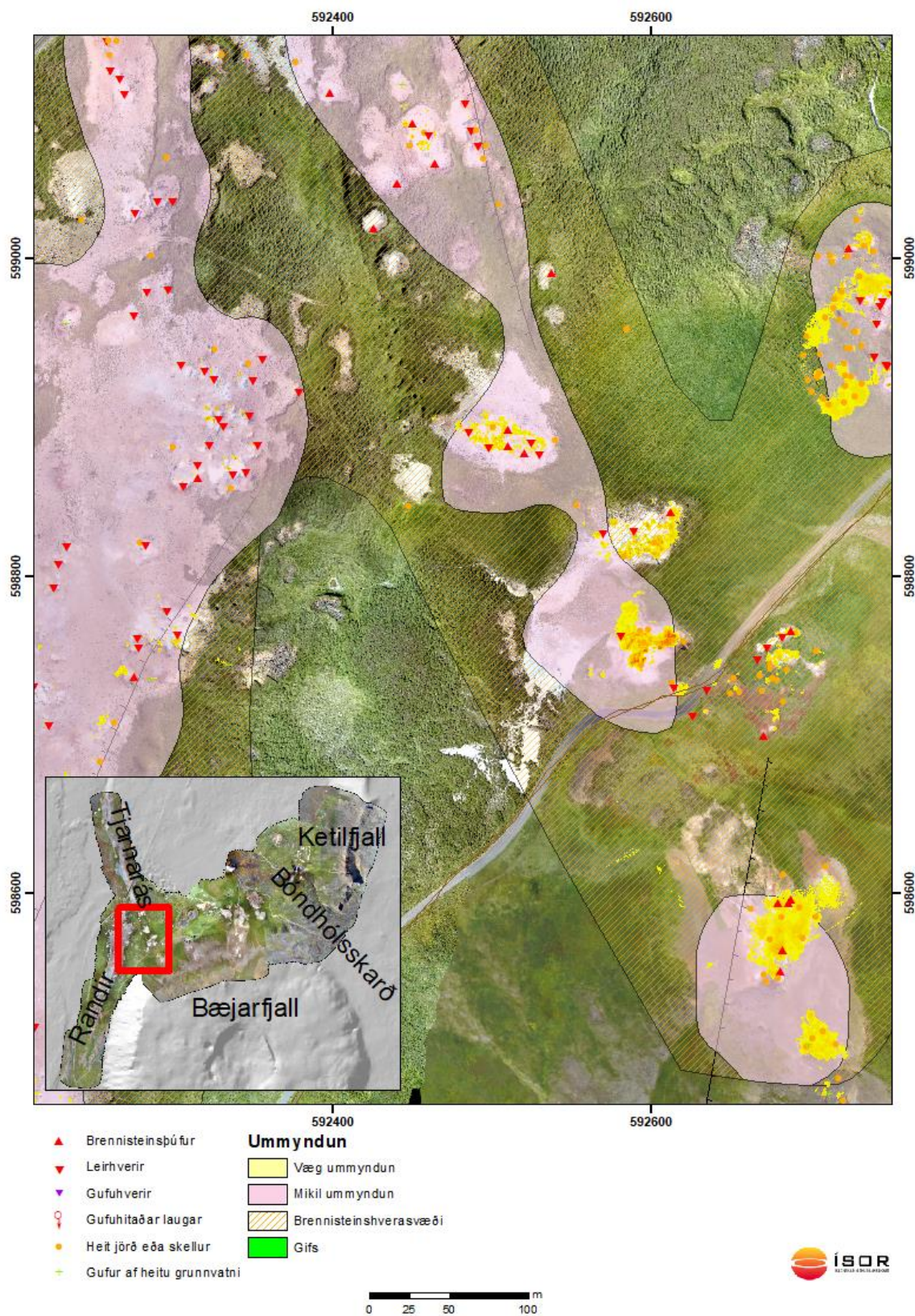


Mynd 28. Drónamynd frá 2020 af jarðhitasvæðinu á Þeistareykjum.

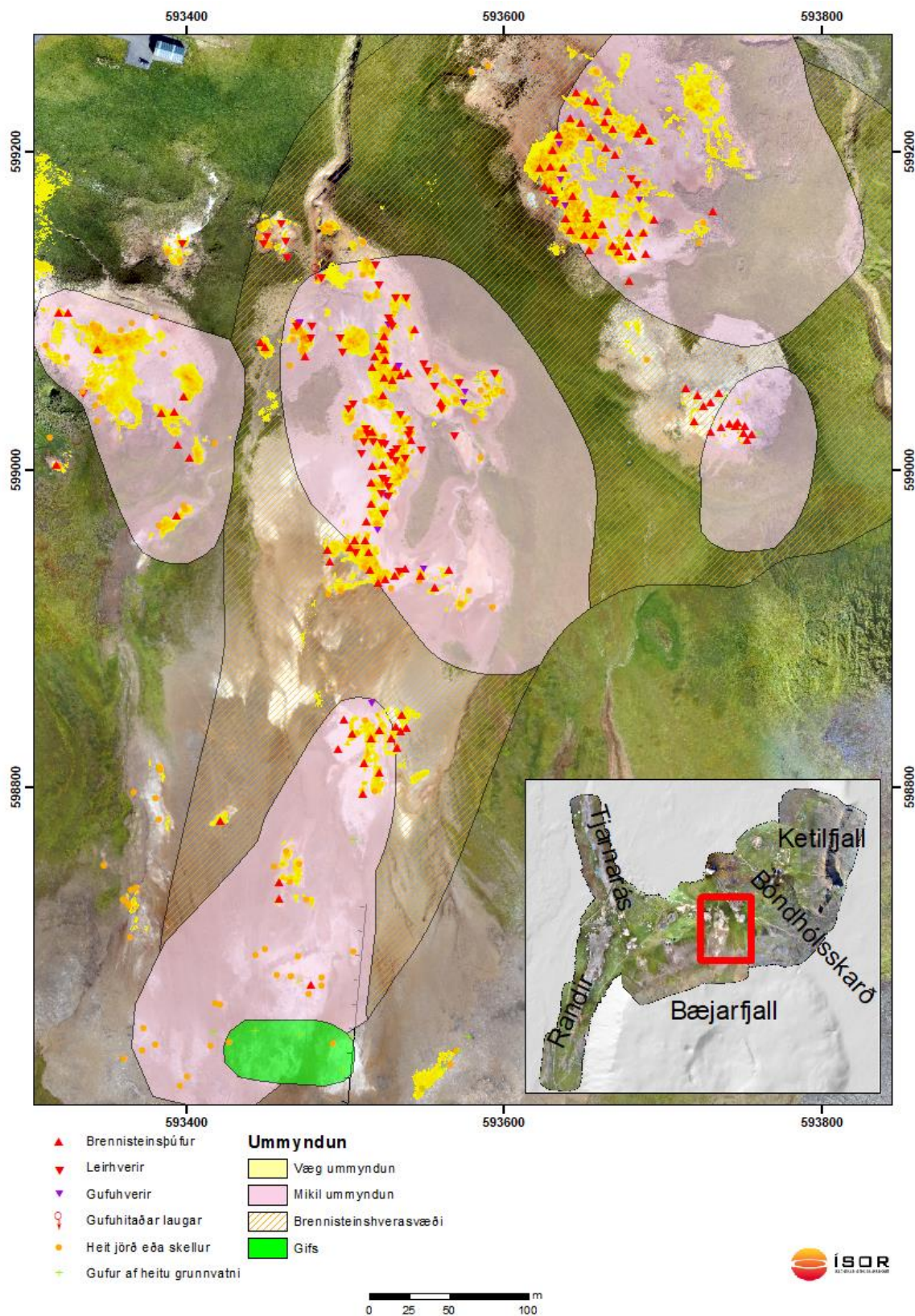
Á myndum 29 og 30 er borin saman fyrri kortlagning á yfirborðsvirkni á jarðhitasvæðinu á Þeistareykjum við niðurstöður kortlagningar sem gerð var með dróna. Það er nokkur munur á kortlagningunni en hann má skýra með gríðarlegum upplausnarmun. Jarðhitakortið er gert fyrir upplausn og mælikvarða 1:25.000–1:50.000 en upplausn í nýjustu myndagögnum býður upp á kortlagningu í mælikvarða 1:500. Eins er staðsetning jarðhitastaða oft ekki nákvæmlega sú sama. Sums staðar getur verið um að ræða raunverulega færslu á virkni í gufuaugum, eða að virkni komi fram á nýjum stað og fjari út á öðrum. Annars staðar getur það stafað af því að við kortlagningu á jarðhitasvæðum er oft ófært á tiltekna staði sökum hita og hitamælir því settur með kapli frá öruggum stað út í hverinn. GPS-punktur er svo tekinn á þeim sama stað. Því gæti verið mismunur upp á 0,5–2 m á merktum stað og þeim stað sem drónamyndirnar sýna.

Þessi gögn sýna þróun í virkni jarðhitans á Þeistareykjum. Það eru helst tvö svæði þar sem virkni er greinileg á drónamyndum frá 2020 en ekki á eldri gögnum. Annað er við norðurbrún Bæjarfjalls, þar sem virkni teygir úr sér til vesturs, og hitt við Ketilfjall þar sem ný virkni kemur fram nálægt borholum ÞG-3, ÞG-6 og ÞG-7. Myndir 31–33 sýna þessa staði.

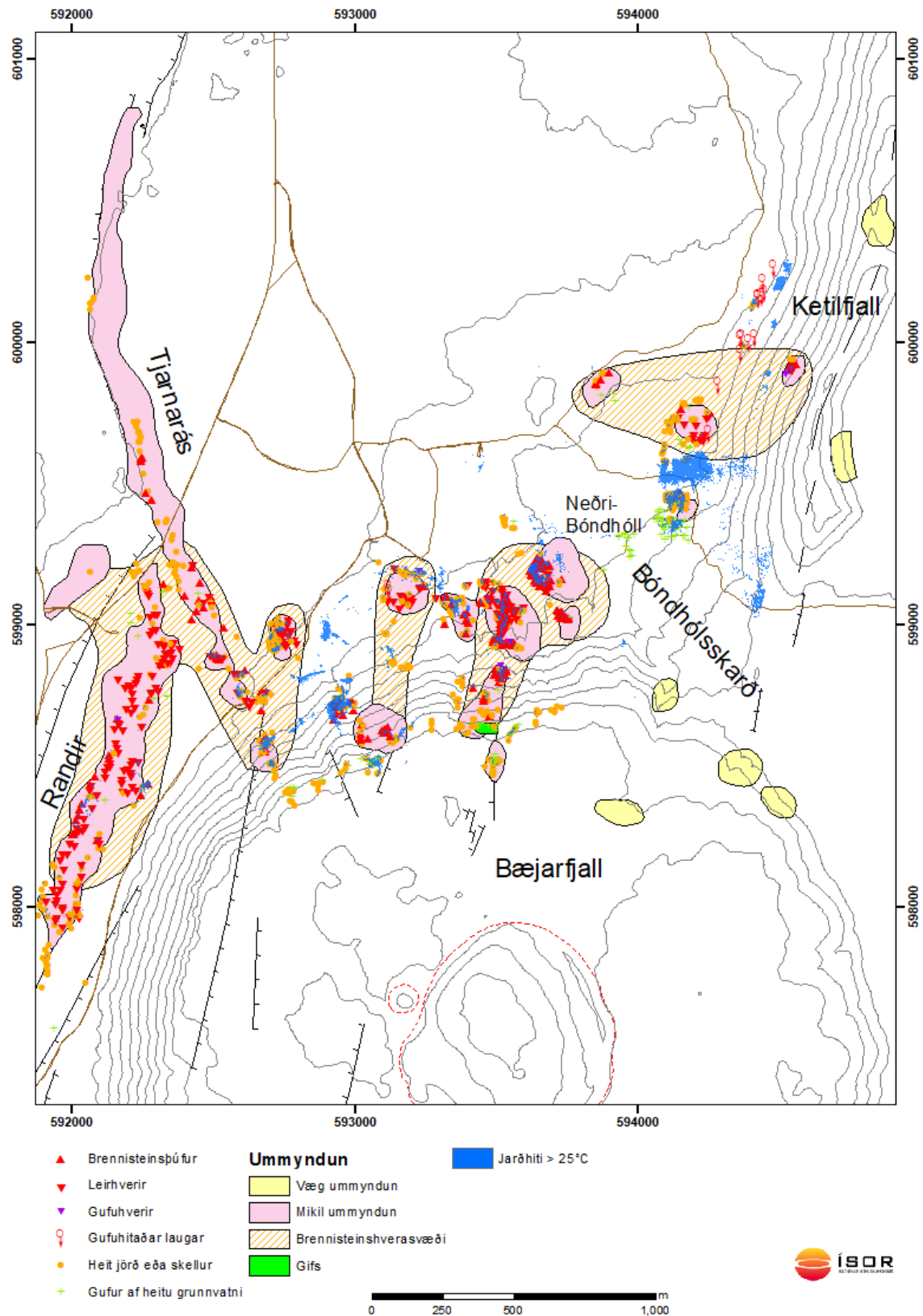
Nokkuð getur verið um staði þar sem hitamyndin sýnir hærri gildi sem ekki tengjast jarðhita. Í flestum tilfellum hafa þau verið tekin út af þeim myndum sem sýndar eru hér. Það getur stafað af breytilegum aðstæðum milli fluga, þar sem raki í lofti, hitastig og vindur hefur áhrif á þéttleika gufu sem streymir í andrúmsloftið, hvort heldur sem er náttúrulega eða frá blásandi borholu. Þau gildi eru flest við lægri mörk þess sem hér er túlkað sem virkur jarðhiti.



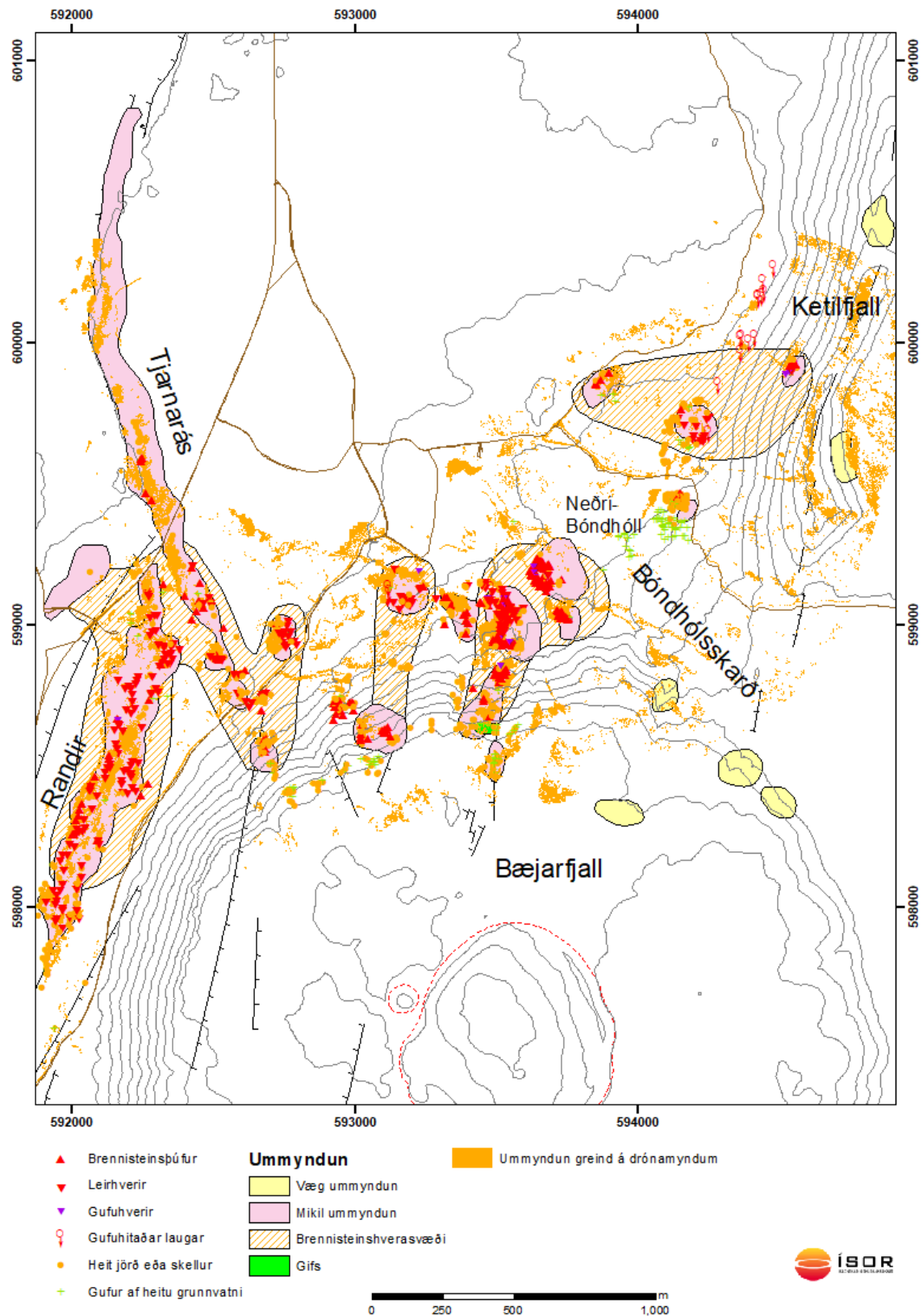
Mynd 29. Jarðhiti á Röndum eins og hann kemur fram á drónamyndum 2020 borinn saman við ummýndunarfláka af jarðhitakorti (Kristján Sæmundsson, 2007) og kortlagða jarðhitapunkta (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2018).



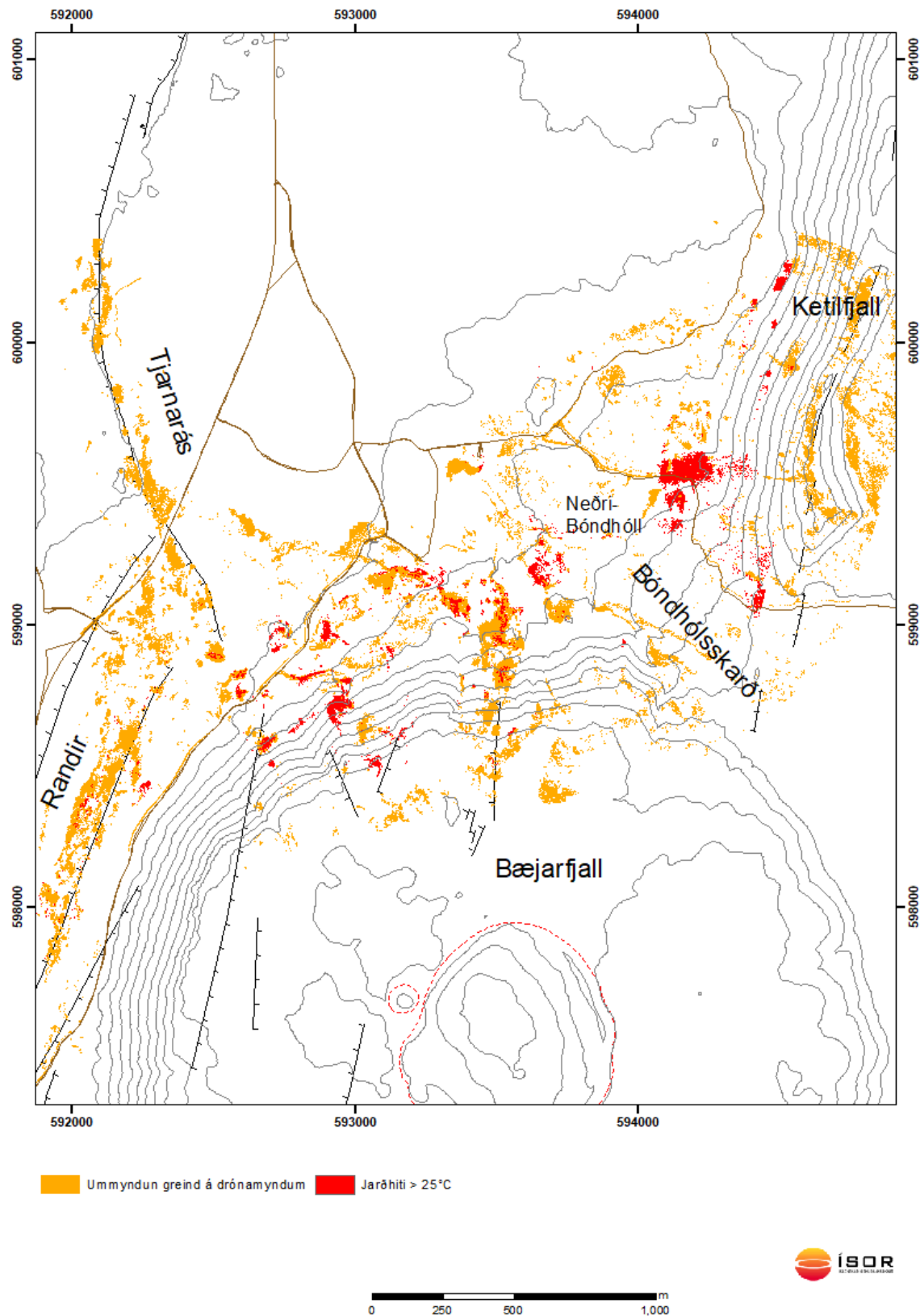
Mynd 30. Jarðhiti við norðanvert Bæjarfjall eins og hann kemur fram á drónamyndum 2020 borinn saman við ummyndunarfláka af jarðhitakorti (Kristján Sæmundsson, 2007) og kortlagða jarðhitastaði (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2018).



Mynd 31. Virkur jarðhiti (bláar skellur) ofan á jarðhitakorti (Kristján Sæmundsson, 2007; Sigurður Kristinnsson o.fl., 2018).



Mynd 32. Ummyndun sem greina má á flugmyndum (appelsínugular skellur) ofan á jarðhitakorti (Kristján Sæmundsson; 2007; Sigurður G. Kristinsson, o.fl., 2018).



Mynd 33. Virkur jarðhiti og ummyndun sem reiknuð er af drónamyndum.

2.2.6 Samantekt

Í ágúst og september 2020 voru teknar 6447 loftljósmyndir og 6627 hitamyndir með dróna ÍSOR á Þeistareykjum. Auk drónamynda var safnað GPS-hnitum með Trimble DA-1 staðsetningartæki með nákvæmni upp á 0,5 m á jörðu niðri af 130 punktum til staðfestingar myndmælipunkta.

Þetta er önnur aðferðafræði en beitt hefur verið undanfarin ár. Misræmi milli kortlagningar með dróna sem lýst er hér og eldri gagna stafar að mestu af mun á þeirri upplausn sem kortlagt er í og takmörkunum á þessum mismunandi aðferðum. Hér fást nákvæmari staðsetning á virkum jarðhita, enda getur nokkrum metrum munað á staðnum þar sem GPS-punktur er tekinn og þar sem hitamælir er í hver. Sama er uppi á teningnum í samanburði við eldri loftmyndir en á þeim ekki hægt að greina einstaka jarðhitastaði, aðeins ummynduð svæði. Með myndgreiningu á drónamyndum fæst hins vegar tæmandi yfirlit yfir svæðið og má greina milli virks og óvirks jarðhita.

Samanburður við eldri loftmyndir og jarðhitakort sýnir þróun í virkni jarðhitans á Þeistareykjum. Það eru helst tvö svæði þar sem virkni er greinileg á drónamyndum frá 2020, en ekki á eldri gögnum. Annað er við norðurbrún Bæjarfjalls, þar sem virkni teygir úr sér til vesturs, og hitt við Ketilfjall þar sem ný virkni kemur fram nálægt borholum ÞG-3, ÞG-6 og ÞG-7.

2.3 Gasflæði um jarðveg á Þeistareykjum

2.3.1 Almennt um gasflæðimælingar

Hluti umhverfiseftirlits á jarðhitasvæðunum þremur á NA-landi, Þeistareykjum, Kröflu og Námafjalli, hefur falist í að mæla flæði koldíoxíðs um jarðveg og hitastig í jarðvegi. Í fyrstu voru gasflæðimælingarnar á svæðunum þremur gerðar á mælilínunum sem liggja vítt og breitt um jarðhitasvæðin en ekki í samfelldu mælineti, fyrst og fremst vegna þess hve jarðhitasvæðin eru víðfeðm. Árið 2012 voru fyrstu gasflæðimælingar gerðar á Þeistareykjum og var markmið þeirra að fá hugmynd um náttúrulegt gasflæði um jarðveg og útbreiðslu þess á svæðinu. Mælingarnar voru gerðar á mælilínunum en ókostir mælilínanna eru að út frá slíkum mælingum fást ekki jafn góðar myndir af útbreiðslu gasflæði- og hitastigsfrávika og ekki er heldur mögulegt að leggja mat á heildargaslosun um jarðveg. Út frá niðurstöðunum frá 2012 lá fyrir að koldíoxíðflæði er ekki einskorðað við afmarkað svæði á Þeistareykjum heldur kom fram koldíoxíðflæði vítt og breitt á þeim mælilínunum sem mældar voru þá. Í ljósi fyrirhugaðrar vinnslu á Þeistareykjum var lagt upp með að kortleggja betur gasflæðið um jarðveg á svæðinu með því að mæla stóran hluta svæðisins sumarið 2015 á mælineti ásamt því að endurtaka mælingar á mælilínunum frá því 2012. Mælingarnar 2015 voru mjög ítarlegar og nokkuð tímafrekar en gáfu skýra mynd af gasflæði um jarðveg. Í aðdraganda mælinganna sumarið 2018 var ákveðið að stækka aðeins möskvastærðina á mælinetinu og fækka þannig mælipunktum án þess að það kæmi um of niður á niðurstöðunum. Sumarið 2020 var mælt á sama svæði og mælt var sumarið 2018 en auðsýnt var að yfirborðsvirkni hafði aukist til norðurs meðfram Ketilfjallinu, og var einnig mælt þar.

Mælingar af þessu tagi byggjast á því að í jarðhitavökva er ávallt að finna nokkurt magn uppleystra gastegunda sem berast inn í kerfið, t.d. með kviku í rótum kerfisins. Yfirleitt er CO₂ í mestum styrk en H₂S og H₂ eru einnig algengar jarðhitagastegundir. Koldíoxíð getur borist út úr jarðhitakerfinu, t.d. með útfellingu kalsíts og blöndun jarðhitavatns og gufu við kalt grunnvatn en þegar gufa myndast við náttúrulega suðu í kerfinu leita gastegundirnar í gufufasann og fylgja gufunni þegar hún leitar upp á við. Á yfirborði koma fram gufuaugu og leirpyttir þar sem gufan hefur náð til yfirborðs og er hún þá yfirleitt vel sýnileg en stór hluti gufunnar berst ekki til yfirborðs. Sá hluti þéttist á leið sinni áður en hann nær til yfirborðs, t.d. þegar gufan kemst í snertingu við kalt grunnvatn eða þar sem gufan streymir um gropinn berggrunn og streymið er ekki nægjanlegt til að hita umhverfið að suðu. Við þær aðstæður þar sem vatnsgufan þéttist getur hluti gassins sem henni fylgdi komist áfram til yfirborðs. Þannig getur talsvert magn af CO₂ streymt upp í gegnum jarðveg og jarðhitaskellur án þess að þess sjáist nein ummerki á yfirborði. Rannsóknir á jarðhitasvæðum víða um heim, og einnig á Reykjanesi og í Kröflu, hafa sýnt að það magn sem kemur um jarðveg er yfirgnæfandi miðað við gufuaugu og leirpytti (Favara o.fl., 2001; Chiodini o.fl., 2005; Fridriksson o.fl., 2006) og má gera ráð fyrir að svipað eigi við um Þeistareyki.

Þar sem gufan sem flytur koldíoxíð til yfirborðs myndast vegna suðu í jarðhitakerfinu geta breytingar á koldíoxíðflæði um jarðveg gefið góðar vísbendingar um suðuástand í kerfinu. Við orkuvinnslu úr jarðhitakerfum er jarðhitavökvi numinn úr kerfinu og þar með breytist þrýsti-ástand kerfisins. Kerfisbundnar gasflæðimælingar á jarðhitasvæðinu á Reykjanesi í rúmlega áratug hafa glögglega sýnt hvernig suða í jarðhitakerfinu hefur aukist samfara þrýstilækkun vegna vinnslu fyrir Reykjanesvirkjun (Þráinn Friðriksson o.fl., 2010; Auður Agla Óladóttir, 2012; Óladóttir og Fridriksson, 2015).

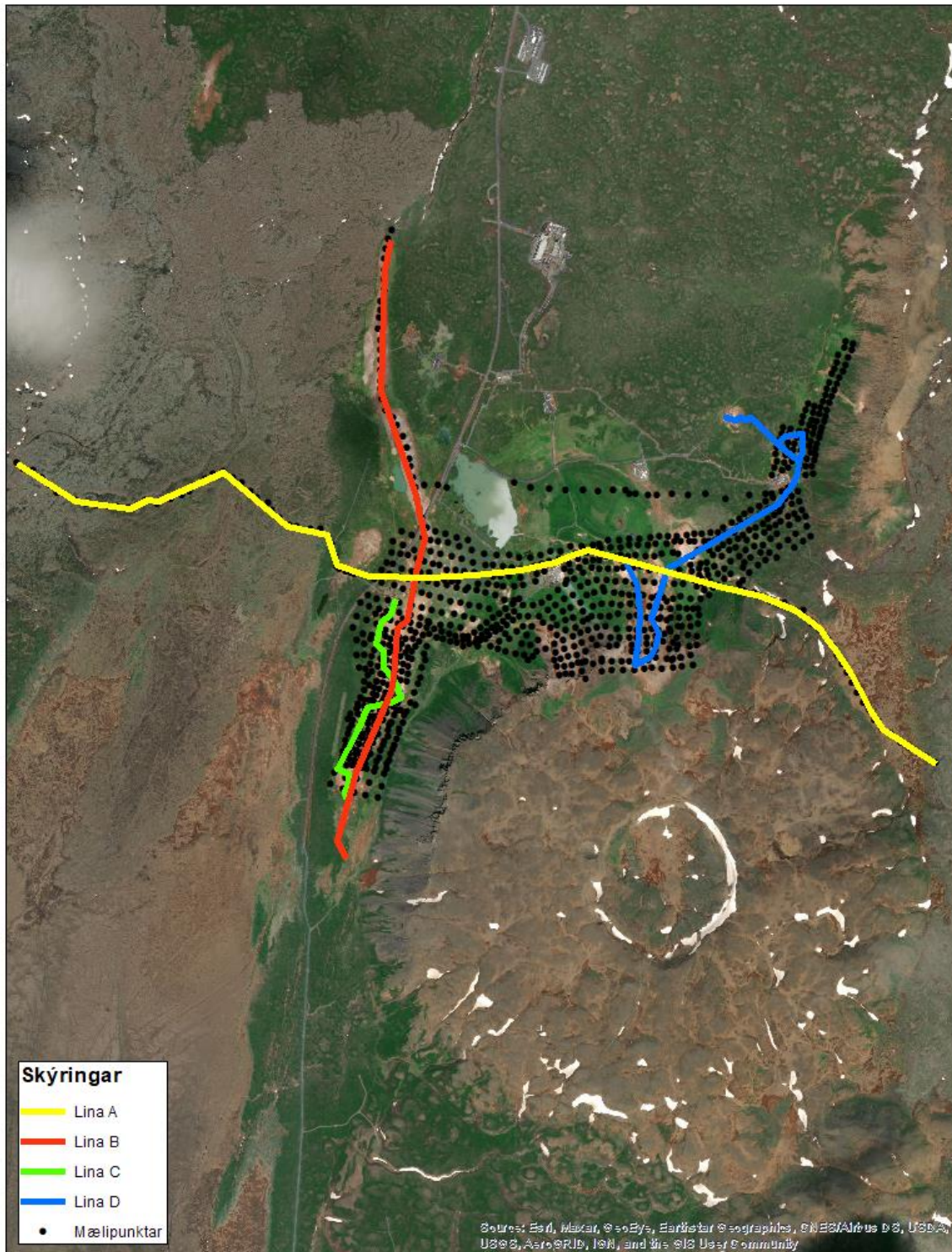
Við gasflæðimælingar á Íslandi og víða um heim á jarðhitasvæðum og eldfjallasvæðum er algengast að notast sé við svokallaðar pottmælingar (e. *closed chamber method*) þar sem mældur er hraði uppsöfnunar koldíoxíðs í lokuðu rými eða potti sem lagður er þétt ofan á jörðina (Cardellini o.fl., 2003; Þráinn Friðriksson o.fl., 2010). Hallatalan á styrk koldíoxíðs í pottinum með tíma á meðan á mælingu stendur (þ.e. uppsöfnunarhraði koldíoxíðs) er mælikvarði á gasflæðið. Tekur það um 1–3 mínútur í hverri mælingu að ná stöðugu gildi. Rannsóknir hafa sýnt að þessi aðferð er ábyggileg og endurteknar mælingar gefa sambærilegar niðurstöður frá einum degi til annars nema þegar jarðvegur er mjög blautur eftir mikla úrkomu en þá getur flæðið minnkað tímabundið (Granieri o.fl., 2003; Auður Agla Óladóttir, 2012). Sömu aðferðir og tækjabúnaður hefur verið notaður í öllum mælingum sem gerðar hafa verið í Kröflu, Námafjalli og á Þeistareykjum síðasta áratuginn, eða fram til ársins 2019 en þá var tekinn í notkun nýr mælir, sömu gerðar, sem hefur verið notaður upp frá því samhliða eldri mælinum. Gasflæðimælarnir er frá WestSystems og þann eldri má sjá á mynd 34.



Mynd 34. Annar af gasflæðimælunum sem notaðir voru til mælinga á Þeistareykjum sumarið 2020.

2.3.2 Gasflæðimælingar á Þeistareykjum sumarið 2020

Gasflæðimælingarnar voru gerðar á Þeistareykjum um miðjan ágústmánuð 2020. Mælingarnar voru gerðar á mælineti með um 40–50 m möskva sem nær yfir þann hluta Þeistareykja þar sem yfirborðsvirkni er mest áberandi. Þetta er í fyrsta lagi svæðið sem teygir sig suður Randir og norður að tjörninni við syðsta hluta Tjarnaráss, í öðru lagi svæði sem nær upp á Bæjarfjall og yfir virknina við sæluhúsið og Neðri-Bóndhól og í þriðja lagi var lítið svæði á grundunum vestan við Ketilfjall einnig mælt á mælineti. Að auki var mælt á mælinunum fjórum sem áður voru mældar sumrin 2012, 2015, 2018; að Stórahver, eftir Tjarnarási og upp Bóndhólsskarð með um 50 m millibili, svo og á einni mælinu sem aðeins var mæld 2015 og 2018, og hefur stefnuna austur-vestur og liggur á flatanum milli vinnubúðanna og Ketilfjalls. Eina svæðið þar sem mælingum var bætt við sumarið 2020 var sunnan og austan við borteig C (holur ÞG-3, ÞG-6, ÞG-7, ÞG-12 og ÞG-16) og í áttina upp að Bóndhólsskarði en þar hefur orðið augljós aukning á yfirborðsvirkni á síðustu tveimur árum. Að þessu sinni voru tvö mælitæki tiltæk svo tveir starfsmenn gátu mælt koldíoxíðflæði á svæðinu samhliða. Allir mælistaðir eru sýndir á mynd 35. Auk mælinga á gasflæði var hitastig mælt á 15 cm dýpi í öllum mælipunktunum. Alls var hitastig og koldíoxíðflæði mælt í 1080 mælipunktum. Veður var þurr og gott þegar mælt var og ekki ástæða til að ætla að jarðvegsraki hafi haft áhrif á niðurstöðurnar.



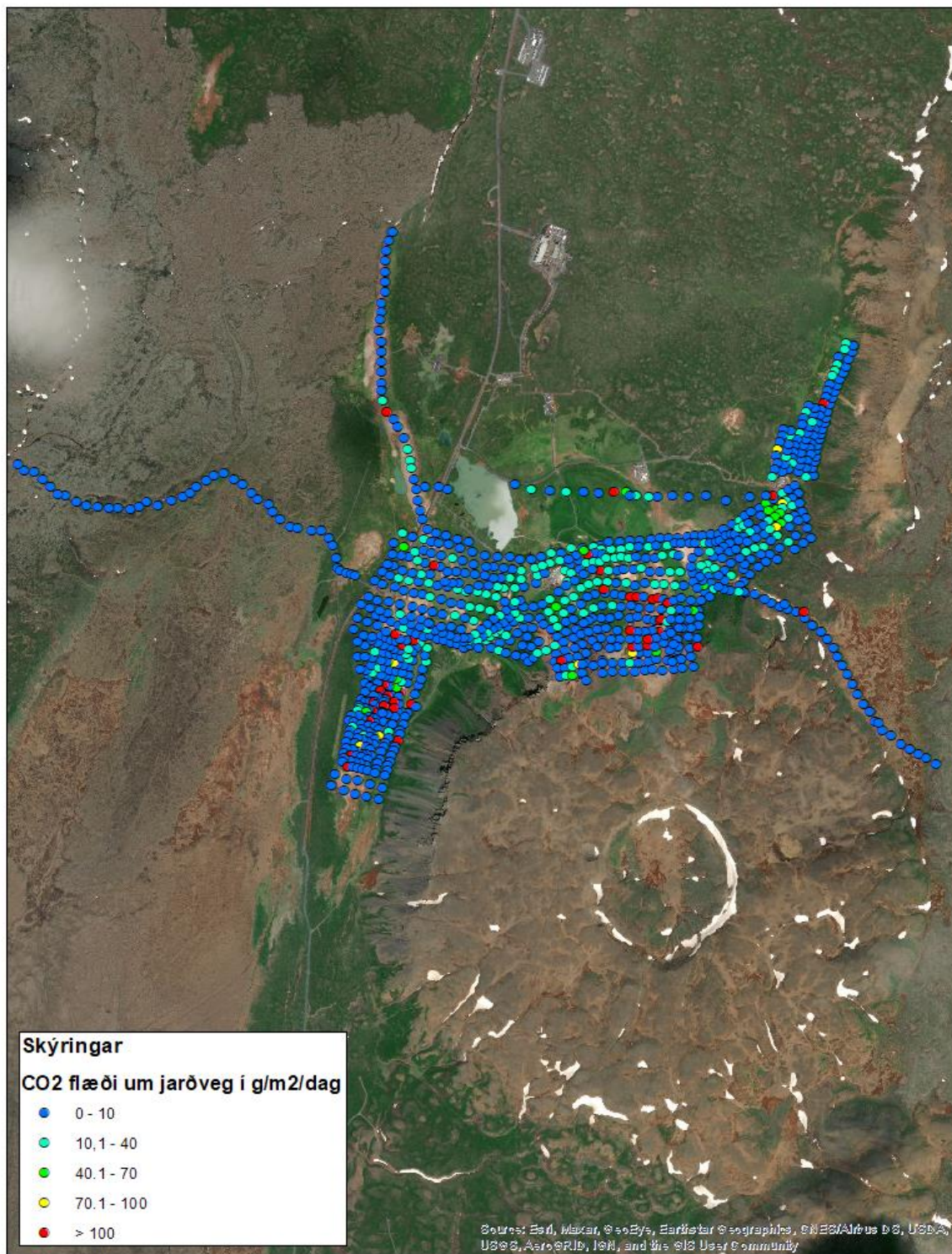
Mynd 35. Mælingar á jarðvegshitastigi og koldíoxíðgasflæði um jarðveg á Peistareykjum. Mælinúr sem mældir voru bæði 2012, 2015, 2018 og 2020 eru merktir með samfelldum línum. Mælinúra A er gul og nær frá Stórahver í vestri og upp í Bóndhólsskarð í austri, mælinúra B er rauð og nær frá Tjarnarási og suður Randir, mælinúra C er græn og einnig staðsett á Röndum og mælinúra D er blá og gengur í sveig upp í Bæjarfjall og síðan norður meðfram Ketilfjalli og yfir virka jarðhitann sem þar er að finna.

2.3.3 Niðurstöður

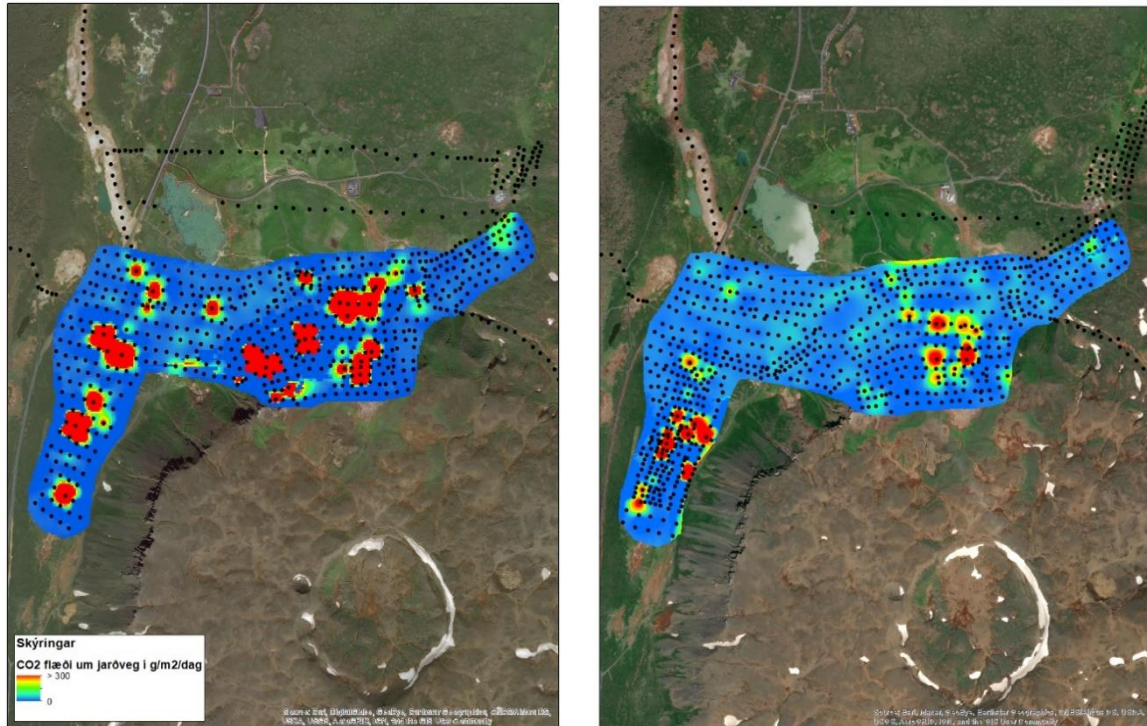
Niðurstöður mælinganna eru settar fram myndrænt á kortum, annars vegar koldíoxíðflæði (á myndum 36 og 37) og hins vegar jarðvegshitastig (á mynd 38). Koldíoxíðgasflæði og heit jörð kemur víða fram á Þeistareykjum en oft er um að ræða afmarkaða bletti þar sem jarðvegshiti og koldíoxíðgildi mælast há, sem er fremur frábrugðið því sem þekkist t.d. á Reykjanesi þar sem há gildi koma fyrir á frekar stórum, samfelldum svæðum en lítið utan þeirra (Óladóttir og Fridriksson, 2015).

Í Kröflu og á Reykjanesi hefur tölfræðilegum aðferðum verið beitt til að greina á milli gasflæðis frá jarðhita annars vegar og bakgrunnsgildis, þ.e. gasflæðis frá líffræðilegri virkni af völdum gróðurþekju eða lífvera (Ármannsson o.fl., 2007). Bakgrunnsgildin á þeim svæðum hafa verið á bilinu 1,6–6,0 (g/m²)/dag en tölfræðileg skoðun á gagnasettinu frá Þeistareykjum bendir til að bakgrunnsgildi þess sé ívið hærra, eða allt að (10/m²)/dag. Í 38% tilvika voru mæligildin yfir bakgrunnsgildum og í stöku punktum mældist mjög mikið koldíoxíðflæði og er þetta mjög svipað niðurstöðunum frá 2015 og 2018. Í 56 punktum mældist koldíoxíðflæði mjög hátt, eða yfir 100 (g/m²)/dag sem er svipað og 2018 þegar gildi yfir 100 (g/m²/dag) voru 55 talsins.

Þegar unnið er með mælingar sem gerðar eru á mælineti er unnt að nota tölfræðilegar aðferðir til að brúa á milli þeirra punkta sem mældir eru. Hér er farin sú leið að nota svokallaða „kriging-aðferð“ til að brúa á milli gilda hvers mælipunkts en það er fremur einföld brúunar-aðferð. Á myndum 36 og 37 má sjá að hækkað koldíoxíð kemur fram vítt og breitt um svæðið en myndar hvergi stórar, samfelldar breiður. Jafnframt virðist sem virkir mælipunktar komi fram töluvert tilviljanakennt á svæðinu, þ.e. punktar eða blettir með mikla virkni geta komið fram mjög víða en eru ekki einskorðaðir við skýrt afmarkað virkt svæði þótt flestir blettirnir séu á svæðum þar sem jarðhitavirkni er sjáanleg á yfirborði. Þetta kom skýrt fram fyrst í mælingunum árið 2015 og mælingarnar frá 2018 og aftur nú 2020 sýna sömu niðurstöðu. Þessi blettótta virkni er einkennandi fyrir koldíoxíðflæðið á Þeistareykjum og stafar hugsanlega af öflugum grunnvatnsstreymi á Þeistareykjum sem torveldar því að koldíoxíð berist til yfirborðs nema þar sem uppstreymið er nógu öflugt. Þó má benda á að svo virðist sem gildin í næstlægsta flokknum í flokkuninni sem hér er stuðst við virðast vera fleiri en áður, þ.e. gildi sem eru rétt aðeins yfir bakgrunnsgildi. Kann þetta að benda til aðeins aukinnar útbreiðslu koldíoxíðsflæðis í efsta hluta yfirborðs jarðar. Svo virðist sem aðeins hafi dregið úr gasflæði um yfirborð á Þeistareykjum milli áranna 2018 og 2020 (mynd 37).



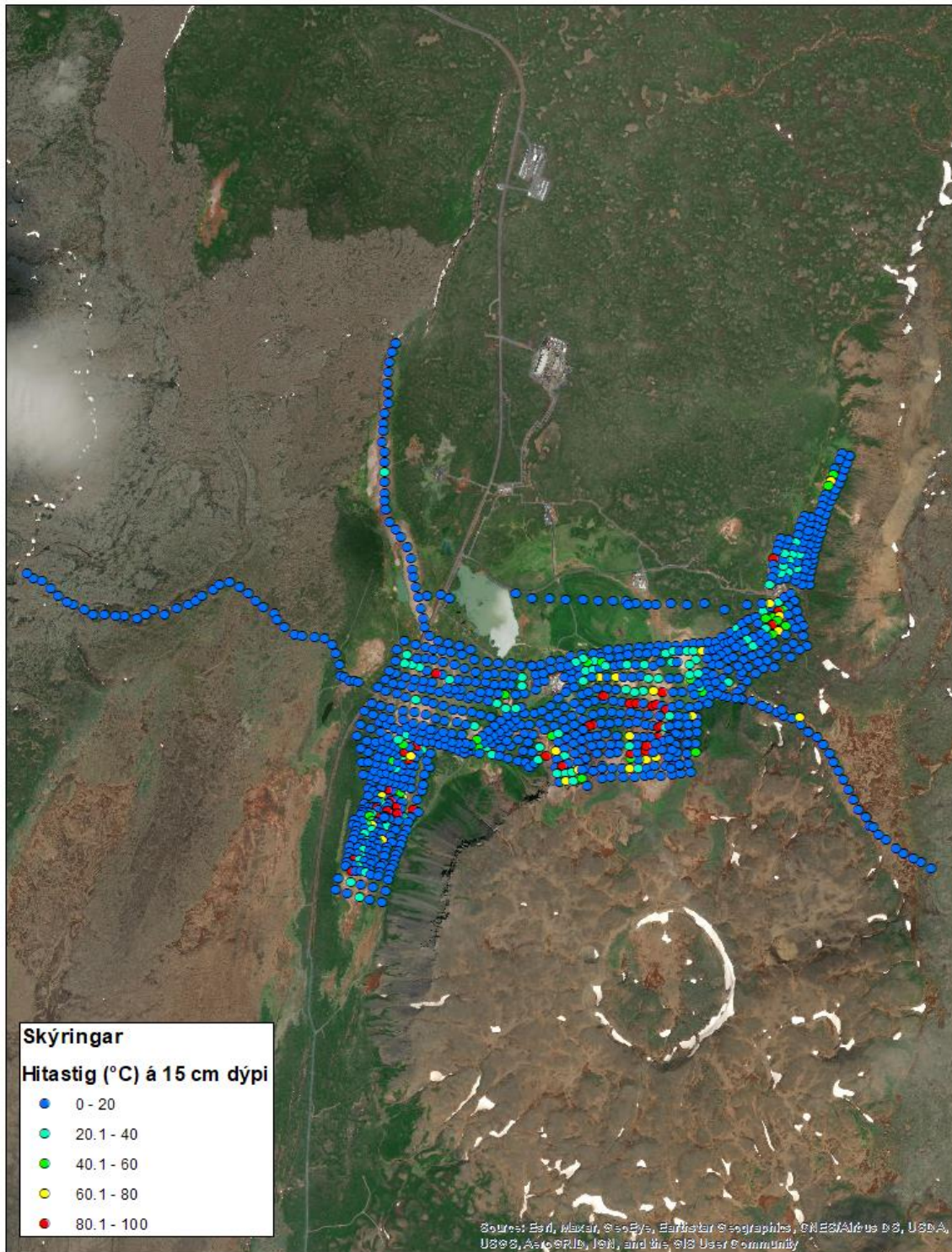
Mynd 36. Niðurstöður gasflæðimælinga um jarðveg á Peistareykjum.



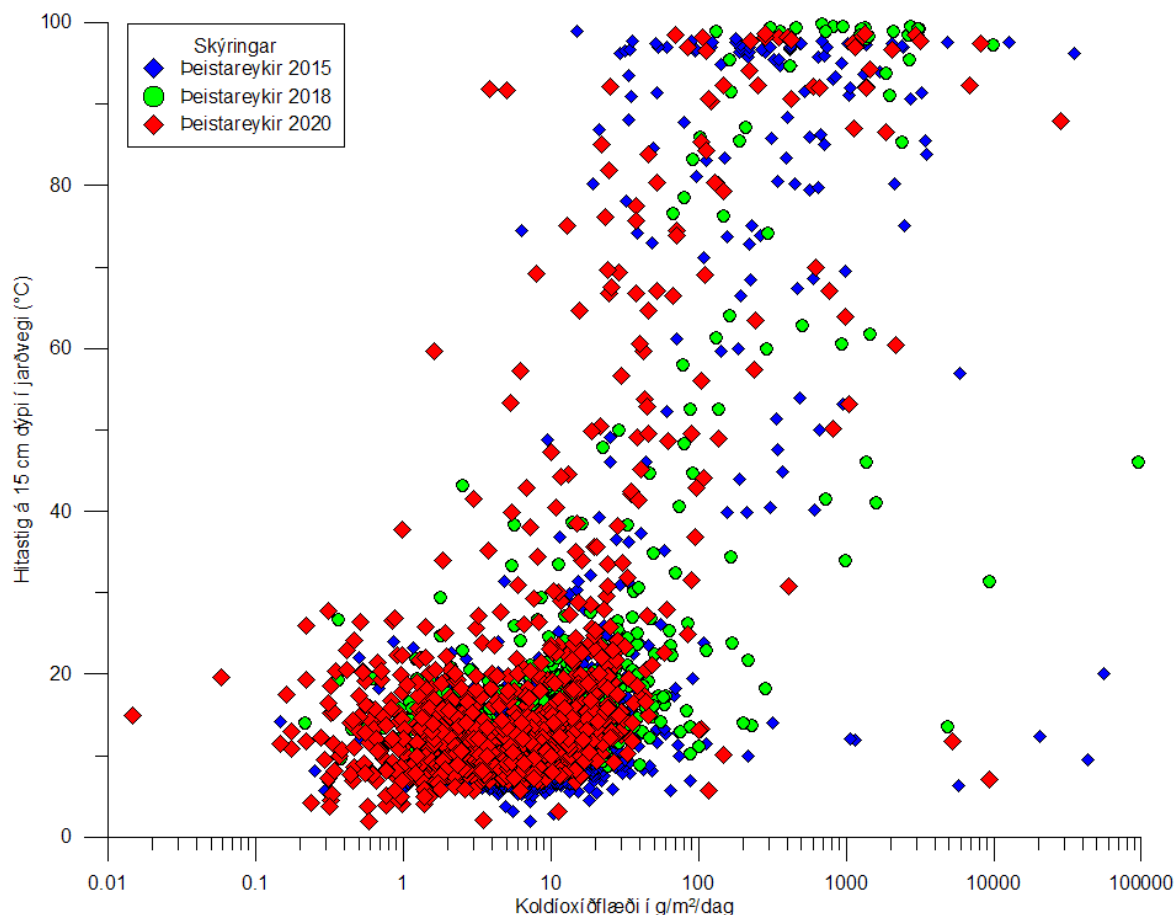
Mynd 37. Gasflæðimælingar á Peistareykjum, 2018 vinstra megin og 2020 hægra megin. Niðurstöður punktmælinga sem brúaðar eru með „kriging-aðferð“. Svartir punktar sýna mælipunktana.

Á mynd 38 má sjá niðurstöður hitamælinga sem gerðar voru á 15 cm dýpi í sömu mælipunktum og koldíoxíðmælingarnar. Hitastig var lágt í flestum mælipunktum, í um 80% tilvika mældist hiti undir 20°C en 85% árið 2018. Mælipunktar þar sem hiti var á bilinu 20–100°C voru samtals 208 og dreifast þeir nokkuð um svæðið eins og sjá má á myndinni.

Á mynd 39 má sjá koldíoxíðgildi borin saman við jarðvegshitagildi í sömu mælipunktum. Þegar gögn um hitastig á 15 cm dýpi í jarðvegi eru borin saman við koldíoxíðflæði í sömu mælipunktum kemur í ljós að þetta tvennt fer ekki saman í öllum tilvikum þótt viss fylgni sé milli þessara þátta. Í langflestum mælipunktum var hitastig lágt, eða undir 20°C. Í þeim punktum mældist koldíoxíðflæði langoftast líka lágt en í einstaka punktum nær CO₂-flæðið mjög háum gildum þótt jarðvegshitastig sé lágt. Þetta var þó mest áberandi árið 2015 en minna bæði 2018 og 2020. Í slíkum punktum getur koldíoxíðflæðið orðið verulega hátt, eða yfir 1000 (g/m²)/dag þrátt fyrir að hiti sé undir 20°C. Slíkar niðurstöður hafa einnig komið fram í mælingum í Kröflu og þar stafar það líklega af því að gufan þéttist frekar djúpt þannig að varminn skilar sér ekki til yfirborðs. Einnig má sjá að þar sem hiti er yfir 20°C fylgir hækkað koldíoxíð nær alltaf, eða í yfir 90% tilvika.



Mynd 38. Niðurstöður jarðvegshitamælinga á 15 cm dýpi sem gerðar voru samtímis mælingum á koldíoxíðflæði.



Mynd 39. Gasflæði um jarðveg og jarðvegshiti á Þeistareykjum 2015 (bláir tíglar), 2018 (grænir hringir) og 2020 (rauðir tíglar). Á x-ás er koldíoxíðflæði á logra-skala.

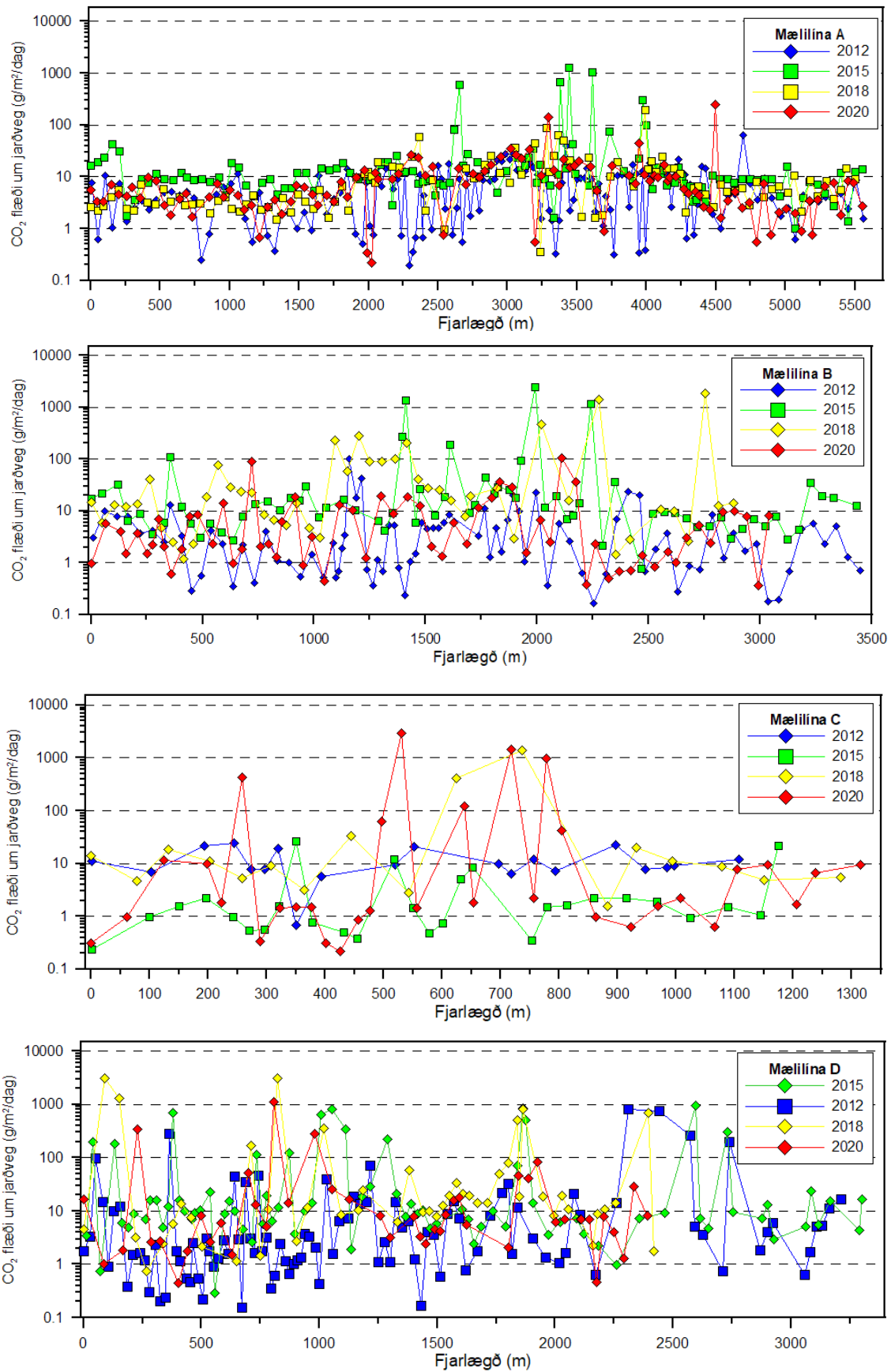
Eins og fyrri mælingarár á Þeistareykjum vekur athygli að mælipunktur, þar sem hitastig er á bilinu 30–80°C, eru mjög fáir, eða aðeins í um 10% tilvika, svipað og fyrri ár. Hugsanleg skýring á þessu gæti verið að öflugur grunnvatnsstraumurinn í Þeistareykjasprungusveimnum komi í veg fyrir að stór hluti varmans geti borist til yfirborðs. Varmi sem kemur frá varmagjafanum í Þeistareykjakerfinu lendir í grunnvatninu og berst burt úr kerfinu. Áætlað hefur verið að grunnvatnsstraumurinn beri þannig með sér um 300 MW af varma frá Þeistareykjum niður í Lón í Kelduhverfi (Halldór Ármannsson, 2001). Aðeins þar sem uppstreymi gufu og koldíoxíðs er verulegt nær það til yfirborðs og mælist hiti þá yfirleitt yfir 80°C og CO₂-flæði vel yfir bakgrunnsgildum.

Niðurstöðurnar frá sumrinu 2020 voru bornar saman við fyrri niðurstöður frá árunum 2012, 2015 og 2018 á Þeistareykjum. Mælt var í nokkurn veginn sömu punktum á hverri mælilínu og áður og sömu mælitæki og aðferðafræði notuð. Milli áranna 2012 og 2015, áður en vinnsla hófst á svæðinu, mátti sjá að í náttúrulegu ástandi sveiflaðist flæði koldíoxíðs töluvert. Algengast var að lítill munur væri milli eldri og yngri mælinga en talsvert var um að gildin hefðu breyst; bæði komu fram punktar þar sem koldíoxíðflæði hafði dregist saman og þar sem koldíoxíðflæði hafði aukist. Til að bera saman þessi gögn voru gerð línurit fyrir bæði koldíoxíðflæði og jarðvegshita fyrir hverja mælilínu um sig. Fyrir línuritinn gildir að á x-ás er fjarlægð í metrum frá einum mælipunkti til þess næsta frá vestri til austurs (mælilína A) og frá

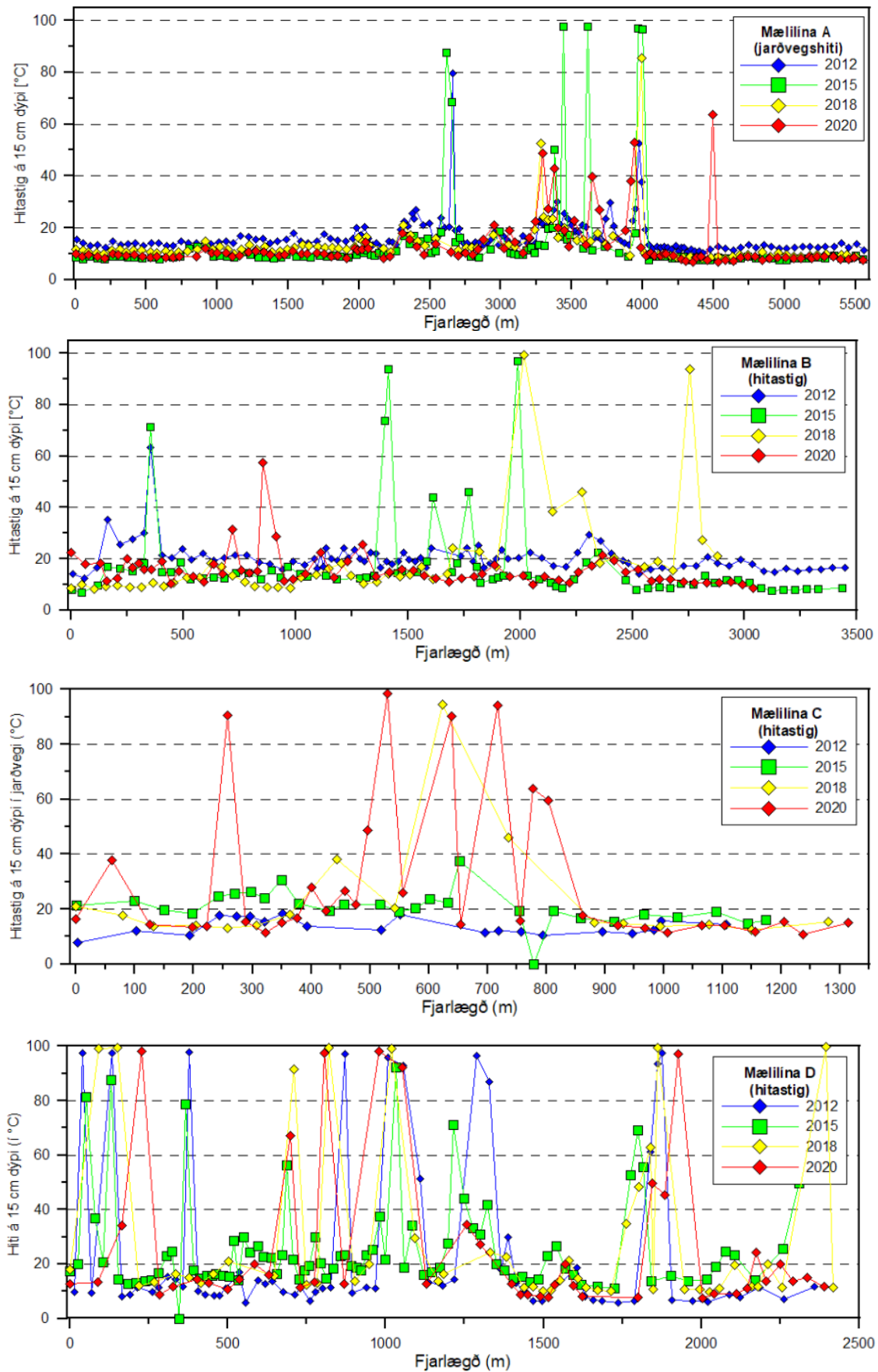
suðri til norðurs (mælilínur B og C) og frá mælilínu A, til suðurs og svo til norðurs (mælilína D). Gasflæðigildin (y-ás) eru sýnd á logra-skala. Niðurstöðurnar eru settar fram á mynd 40.

Mælingarnar frá sumrinu 2020 benda til að koldíoxíðflæði hafi frekar dregist saman á virkustu jarðhitablettunum á Þeistareykjum. Mögulegt er að virknin hafi að einhverju leyti færst til, aukning er sjáanleg á afmörkuðum svæðum en einnig er mögulegt að koldíoxíðflæði um jarðveg sé að dragast saman. Mest áberandi er aukningin á jarðhitavirkni sem áður var nefnd, sunnan við borteig C fyrir neðan Bóndhólsskarð, en koldíoxíðgildi þar eru þó ekki sérlega há, enda enn sem komið er aðallega hiti sem er þar á ferð og veldur aukinni gufuvirkni. Þessi aukning sést því skýrar í jarðvegshitanum. Einnig má nefna að líflegt er yfir jarðhitavirkninni á sléttunni meðfram Ketilfjalli. Ekki er um neina verulega aukningu að ræða á þessum svæðum og of snemmt að draga miklar ályktanir að svo stöddu. Á stöku stað er koldíoxíðflæðið mjög ólíkt milli eldri og yngri mælinga. Slíkir stakir punktar vekja að öllu jöfnu ekki sérstaka athygli þar sem óvissa í GPS-mælingum veldur því að ekki er hægt að tryggja að mælt sé á nákvæmlega sömu punktum frá ári til árs. Eins geta þessar sveiflur að einhverju leyti orsakast af samspili jarðhitans og grunnvatnsstraums, eins og áður var vikið að, og smávægilegar breytingar á rennislísiðum gufu upp til yfirborðs geta skapað miklar breytingar í gasstyrk á mælilínunum.

Hitamælingarnar voru unnar á sama hátt og bornar saman við eldri mælingar og eru niðurstöðurnar sýndar á línuritum á mynd 41.



Mynd 40. Koldíoxíðflæði um jarðveg á öllum fjórum mælinunum sem mældar voru sumarið 2020 samanborið við eldri mælingar frá 2012, 2015 og 2018.



Mynd 41. Hitastig á 15 cm dýpi í jarðvegi á öllum fjórum mælinunum sem mældar voru sumarið 2020 samanborið við eldri mælingar frá 2012, 2015 og 2018.

2.3.4 Samantekt

Viðamiklar mælingar á jarðvegshitastigi og koldíoxíðflæði um jarðveg voru gerðar á Þeistareykjum sumarið 2020 og var þar um að ræða endurtekningu á mælingum frá árunum 2018, 2015 og 2012. Mælingarnar voru gerðar í 1080 mælipunktum, bæði á mælineti yfir virkasta hluta svæðisins og einnig á mælinum sem áður höfðu verið mældar. Niðurstöðurnar sýna að virknin á Þeistareykjum er mjög skellótt eða blettótt, þ.e. háan hita og mikið koldíoxíð er oftast að finna á mjög afmörkuðum blettum sem aðeins koma fram á stökum mælipunktum. Slíka punkta er að finna vítt og breitt um svæðið, fyrst og fremst þar sem einnig er jarðhitavirkni á yfirborði. Hitamælingarnar sýndu einnig blettótta virkni og fátítt að heit svæði næðu mikilli stærð.

Samanburður á koldíoxíðflæði eldri mælinga og mælinga frá því sumarið 2020 sýndu að aukning hefur orðið í koldíoxíðflæði á norðurhluta Randa og í norðurhlíðum Bæjarfjalls en ekki er um afgerandi aukningu að ræða. Virknin meðfram Ketilfjalli hefur haldið áfram að teygja sig til norðurs frá því mælt var 2018. Sjáanleg og mælanleg aukning hefur orðið í jarðhitavirkni á yfirborði, þ.e. bæði jarðvegshita og koldíoxíðflæði sunnan við borteig C, sem teygir sig í átt að Bóndhólsskarði og varð þessara breytinga fyrst vart sumarið 2018. Ljóst er á samanburði mælinganna milli áranna 2012 og 2015 að í náttúrulegu ástandi jarðhitasvæðisins á Þeistareykjum getur breytileiki í koldíoxíðflæði um yfirborð verið töluverður og ekki er ljóst hvort sú litla aukning sem nú hefur komið fram er byrjun á þróun sem mun halda áfram og tengist þá vinnslu frá svæðinu eða hvort einungis er um að ræða eðlilegar sveiflur í náttúrulegri yfirborðsvirkni svæðisins. Slíkar sveiflur geta verið umtalsverðar, eins og Ármannsson o.fl. (2000) hafa rakið.

3 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 2020. Starfsmenn ÍSOR söfnuðu sýnum samkvæmt verklagi ÍSOR (Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson, 2006b). Styrkur brennisteinsvetnis, rafleiðni og sýrustig var mælt við sýnatöku auk hitastigs. Sýrustig var einnig mælt samhliða mælingu á karbónati og leiðni á rannsóknarstofu ÍSOR innan tveggja til þriggja sólarhringa frá sýnatöku. Styrkur aðalefna var ákvarðaður á rannsóknarstofu ÍSOR en snefilefni voru greind hjá ALS Laboratories í Luleå í Svíþjóð. Samsætur súrefnis og vetnis voru mældar hjá Isotech Laboratories í Illinois í Bandaríkjunum. Sýnameðhöndlun og efnagreiningaraðferðum er lýst í viðauka 1.

3.1 Mývatnssveit

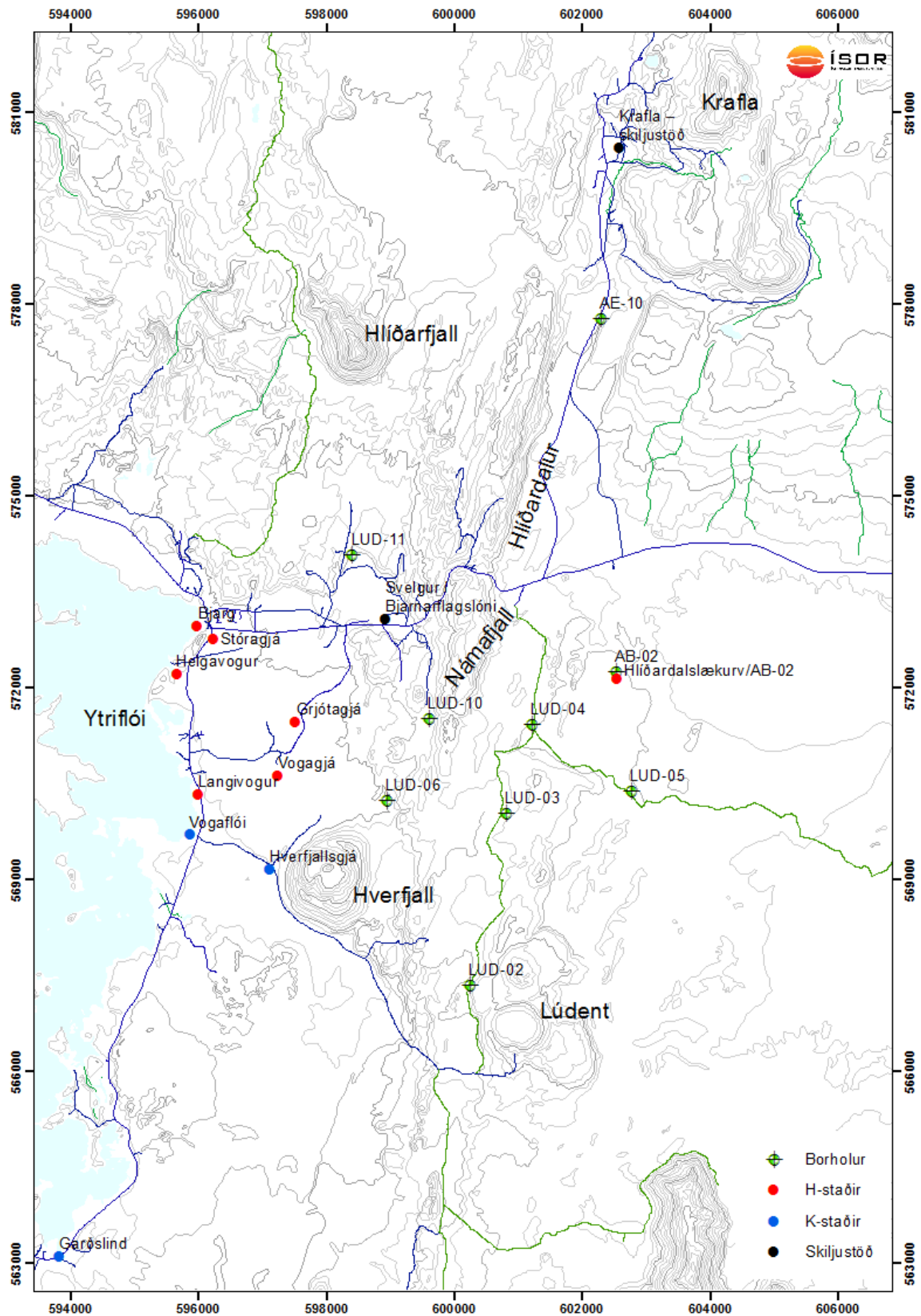
Aðdraganda umhverfisvöktunar með affallsvatni frá Kröflu- og Bjarnarflagsvirkjunum er lýst í skýrslu Halldórs Ármannssonar og Magnúsar Ólafssonar (2004) en tillögur að eftirliti voru settar fram í skýrslum Halldórs Ármannssonar og Magnúsar Ólafssonar (2002) og Halldórs Ármannssonar (2003). Aðferðin byggist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

Á árinu 2020 fór sýnataka að mestu leyti fram um mánaðamótin ágúst-september en þar sem þá var vinnslustopp í Kröflu var sýnum af affallsvatni virkjunarinnar og Hlíðardalslæk safnað í byrjun október. Alls voru tekin sýni á 16 stöðum.

Yfirlit um sýnatökustaðina má sjá í töflu 2 og á mynd 42. Að þessu sinni voru að ósk Landsvirkjunar ekki tekin sýni úr holum AE-10, LUD-2 og LUD-10, né úr lindum við Helgavog. Djúpdælur eru í öllum vöktunarholum á Mývatnssvæðinu og í töflu 2 er einnig sýnt hve miklu var dælt úr hverri holu við sýnatöku. Dælan í holu LUD-11 sló ítrekað út rafstöðinni svo ekki var hægt að taka sýni úr henni.

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

- Sýni af affallsvatni frá skiljustöð í Kröflu og úr Bjarnarflagslóni, auk sýna úr Hlíðardalslæk við holu AB-2 og holu LUD-4, sem hafa hæstan styrk arsens og áls.
- Sýni úr öðrum borholum.
- Sýni úr heitum, volgum og köldum lindum og gjám.



Mynd 42. Sýnatökustaðir í Mývatnssveit. Borholur eru sýndar grænar með krossi. Volgar lindir eru rauðar, kaldar lindir bláar og manngerðir staðir eru svartir. Árið 2020 var sýnum safnað á 16 þessara staða.

Tafla 2. Vöktunarstaðir og yfirlit um dælt magn úr vöktunarholum í Mývatnssveit 2020.

Staður	Staðarnúmer	Sýnanúmer	Dagsetning	Hitastig (°C)	Magn (L)	Rennsli (L/s)	Hnit	
							X	Y
Krafla-skiljustöð	M-20008	20200200	8.10.2020	62,5			602585	580452
Hlíðardalslækur v/AB-2	V-2356	20200203	8.10.2020	10,5			602549	572138
AB-2	B-57842	20200158	1.9.2020	3,1	3645	0,45	602504	572234
LUD-2 ^a	B-58502						600210	567326
LUD-3	B-58503	20200150	31.8.2020	5,5	1794	0,36	600780	570018
LUD-4	B-58504	20200148	31.8.2020	5,6	1794	0,23	601182	571414
LUD-5	B-58505	20200152	31.8.2020	4,2	3150	0,50	602746	570365
LUD-6	B-58506	20200166	3.9.2020	32,1	5522	0,78	598927	570225
LUD-10 ^a	B-58510						599526	571507
LUD-11 ^b	B-58521						598375	574067
Bjarnarflagslón	M-20004	20200169	4.9.2020	12,6			598920	573066
Bjarg	H-10080	20200149	31.8.2020	19,3			595981	572967
Helgavogur ^a	H-10082						595660	572213
Stóragjá	H-10083	20200153	31.8.2020	25,8			596231	572759
Grjótagjá	H-10085	20200170	3.9.2020	44,3			597515	571469
Vogagjá	H-10087	20200159	1.9.2020	39,6			597236	570623
Langivogur	H-10088	20200160	1.9.2020	21,0			595991	570334
Vogaflói	K-558	20200151	31.8.2020	39,6			595856	569697
Garðslind	K-556	20200168	3.9.2020	5,3			593816	563105
Hverfjallsgjá	K-559	20200167	3.9.2020	5,7			597107	569164

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

^b Sýnataka reynd en vandræði við dælingu þegar dæla sló ítrekað út rafmagni. Sýni ekki tekið.

Niðurstöður efnagreininga eru sýndar í töflu 5. Athugið að mælingar fyrir málma úr Grjótagjá voru frá ALS Laboratories og verða endurmetnar á ÍSOR árið 2021. Til glöggvunar eru niðurstöður mælinga á arseni bornar saman við fyrri niðurstöður á myndum 43–45 og fyrir ál á myndum 46–48 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 3). Þessir málmar eru kopar, sínk, kadmíum, blý, króm og nikkell, auk arsens. Niðurstöður fyrir þessa málma eru teiknaðar upp á myndum 49, 51 og 52.

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 eituráhrif áls í fiskeldi og er algengt viðmið að eiturmörk áls sé um 0,3 mg/L gagnvart laxfiskum sem og öðrum fiskum (Branson, 1993).

Tafla 3. Umhverfismörk fyrir málma í yfirborðsvatni til verndar lífríki (styrkur efna í µg/L).

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

Skýringar við töflu 3:

Umvhverfismörk I: Mjög lítil eða engin hættu á áhrifum.

Umvhverfismörk II: Lítil hættu á áhrifum.

Umvhverfismörk III: Áhrifa að vænta á viðkvæmt lífríki.

Umvhverfismörk IV: Áhrifa að vænta.

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

Á myndum 43–45 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 43A. Þar og í affalli frá skiljustöð í Kröflu mælist styrkur arsens ofan við umhverfismörk III (15 µg/L) og í Hlíðardalslæk er styrkur arsens rétt ofan umhverfismarkka II eins og verið hefur undanfarin ár en innan við viðmiðunarmörk fyrir neysluvatn (10 µg/L) eins og nánar er sýnt á mynd 43B 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 (10 µg/L) og liggur einnig innan við umhverfismörk II eins og sést á mynd 44A. Til nánari greiningar á mæligildum fyrir arsen í eftirlitsholum eru niðurstöður sýndar á mynd 44B, 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). Þetta má ugglaut rekja til minnkandi magns af affallsvatni sem fer frá skiljustöðinni í Kröflu til förgunar í Hlíðardalslæk vegna aukinnar niðurdælingar í borholur í Kröflu (tafla 4). Reyndar sker árið 2020 sig nokkuð úr en þá var vinnsla í Kröflu með minnsta móti og niðurdæling að sama skapi lítil. Styrkur arsens í sýnum úr heitum, volgum og köldum lindum er alls staðar innan við umhverfismörk I (0,4 µg/L) eins og sýnt er á mynd 45, að frátöldum tveimur eldri mælingum úr Grjótagjá. Í sýnum ársins 2020 mældist styrkur arsens innan greiningarmarkka (0,05 µg/L) í Grjótagjá, Vogagjá og Langavogi. Athuganir á uppruna vatnsins (Finnbogi Óskarsson, 2018) og ferilprófun á affalli frá Jarðböðunum í Mývatnssveit (Magnús Ólafsson o.fl., 2020) sýna þó að skiljuvatn frá Bjarnarflagsvirkjun skilar sér á þessa þrjá staði. Líklegast er að arsen falli hratt út úr vatninu með myndlausum kísli (en skiljuvatnið er yfirmettað af kísli) og greinist því ekki.

Tafla 4. Niðurdæling og vinnsla vökva í Kröflu (í þúsundum tonna) frá 2015 til 2020.

Niðurdæling [Gg]	2015	2016	2017	2018	2019	2020
IDDP-01	270	-	-	-	-	-
KG-26	1.990	2.196	2.148	2.070	2.124	1.685
KJ-35	-	-	-	501	623	-
KJ-39	1.656	1.463	1.709	1.121	271	73
Heildarniðurdæling	3.916	3.659	3.857	3.692	3.018	1.758
Vökvavinnsla [Gg]	8.899	6.524	10.157	9.102	7.104	6.264

Á myndum 46–48 er sýndur styrkur áls á vöktunarstöðum og litlar markverðar breytingar koma þar fram. Haustið 2018 mældist ál í mjög lágu styrk í Bjarnarflagsslóni, líkt og arsen, en haustið 2019 og 2020 mældist styrkur áls og arsens á svipuðum nótum og verið hefur lengst af frá því mælingar hófust þar. Styrkur áls í vatni frá Bjarnarflagsslóni og skiljustöð í Kröflu mælist vel yfir hámarksgildi fyrir neysluvatn en á öðrum stöðum innan þess eins og sýnt er á mynd 46, þó er styrkur áls í LUD-4 rétt undir viðmiðunarmörkum (mynd 47). Niðurstöður sýna að styrkur áls í vatni úr vöktunarholunum, nema LUD-4, er alls staðar innan við hámarksgildi fyrir neysluvatn (200 µg/L). Mynd 47B 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 48. Þetta sýnir að breytingar eru vart marktækar milli árána 2019 og 2020, nema í Grjótagjá þar sem styrkur áls hefur aukist lítillega síðan 2018.

Mynd 49 sýnir styrk kopars, sínks, kadmíums, blýs, króms og nikkels í affallsvatni frá skiljustöð í Kröflu, Bjarnarflagsslóni, Hlíðardalslæk og holu LUD-4 ásamt viðeigandi umhverfismörkum úr reglugerð um varnir gegn mengun vatns nr. 796/1999. Nokkrir óreglulegir toppar sjást á myndunum, einkum í sýnum frá fyrri tíð, og þá verður að hafa í huga að hér er verið að mæla efni í mjög lágu styrk og óvissumörk eru því nokkuð víð samanborið við mæligildið. Styrkur kopars (mynd 49A) er að jafnaði lægri en umhverfismörk II (3 µg/L), oft nærri umhverfismörkum I (0,5 µg/L). Styrkur sínks (mynd 49B) er vel innan við umhverfismörk I (5 µg/L), nema í skiljustöð í Kröflu þar sem styrkur sínks mælist um 8 µg/L. Á síðastliðnum árum hefur styrkur kadmíums (mynd 49C) mælist um eða nærri umhverfismörkum I (0,01 µg/L) en á árum áður mátti sjá hærri gildi þar sem styrkur þess greindist jafnvel hærri en umhverfismörk III (0,3 µg/L) í einstökum sýnum. Ekki er ólíklegt að það stafi af minni næmni við greiningar á árum áður. Mynd 49D sýnir styrk blýs og kemur þar fram að styrkur þess er innan við umhverfismörk I (0,0002 mg/L), fyrir utan allnokkur sýni úr Bjarnarflagsslóni frá því fyrir 2011 þar sem styrkur þess hefur mælist umtalsvert hærri, stundum við umhverfismörk II (1 µg/L) og í tveimur tilvikum yfir umhverfismörkum III (3 µg/L). Styrkur króms (mynd 49E) hefur verið allbreytilegur, sérstaklega í Bjarnarflagsslóni og Hlíðardalslæk, en mældist nærri umhverfismörkum I (0,3 µg/L) á þessum stöðum í ár. Styrkur nikkels (mynd 49F) mælist að jafnaði hæstur í Hlíðardalslæk, rétt yfir umhverfismörkum I (0,7 µg/L), og minnkaði styrkur þess lítillega milli árána 2019 og 2020.

Vegna aukins styrks arsens í Bjarnarflagsslóninu sem sést á mynd 43A, er styrkur klóríðs, kísils, natríums, bórs, og brómíðs sem og arsens í vatni frá Bjarnarflagsslóni teiknaður upp á mynd 50. Öll þessi efni og fleiri til hafa sýnt hækkandi efnastyrk 2018. Líklega endurspeglar þetta

breytingar eftir stækkun Jarðbaðanna og endurbætur á Bjarnarflagsvirkjun árin 2018 og 2019. Fyrir vikið fer minna vatn út í lónið og uppgufun af því hefur meiri áhrif á efnasamsetninguna.

Mynd 51 sýnir styrk sömu málma og sýndir eru á mynd 49 en í sýnum úr vöktunarholum í Mývatnssveit. Mynd 51A sýnir að styrkur kopars hefur á undanförnum árum verið undir umhverfismörkum II (3 µg/L) og í flestum holum nærri umhverfismörkum I (0,5 µg/L) fyrir utan tvö hærri gildi fyrir 2010 úr holum LUD-2 annars vegar og LUD-4 hins vegar. Styrkur sínks (mynd 51B) hefur verið vel innan við umhverfismörk I (5 µg/L) á undanförnum árum, nema í LUD-11 árið 2019. Vegna bilunar í dælu var sýni var ekki tekið úr LUD-11 árið 2020 og því er ekki ljóst hvort þessi hækkun hafi haldið áfram eða gengið til baka. Styrkur kadmíums (mynd 51C) hefur á undanförnum árum mælst lágur, undir eða við greiningarmörk, og falla mæligildin nærri umhverfismörkum I (0,01 µg/L). Styrkur blýs (mynd 51D) mælist innan við umhverfismörk I (0,2 µg/L) á öllum stöðum. Á mynd 51E 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 51F sýnir styrk nikkels í vöktunarholunum og mældist hann innan við umhverfismörk I (0,7 µg/L) á öllum stöðum 2020.

Mynd 52 sýnir 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 2019 og 2020.

Tafla 5. Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum haustið 2020. Styrkur efna er í mg/L.

Staðarnafn	Skiljustöð	Hlíðardalslækur	AB-2	LUD-5	LUD-4	LUD-3
Staður	M-20008	V-2356	B-57842	B-58505	B-58504	B-58503
Dagsetning	2020-10-08	2020-10-08	2020-09-01	2020-08-31	2020-08-31	2020-08-31
Sýnanúmer	20200200	20200203	20200158	20200152	20200148	20200150
Hitastig (°C)	62,5	10,5	3,1	4,2	5,6	5,5
Sýrustig (pH°C) - ÍSOR	9,87 / 21,2	7,57 / 21,6	7,98 / 13,6	8,58 / 21,6	8,06 / 21,1	8,47 / 21,4
Sýrustig (pH°C) - Felt	9,46 / 25,0	8,13 / 10,5	8,10 / 3,1	8,73 / 4,2	8,46 / 5,6	8,69 / 5,5
Leiðni við 25°C (µS/cm)	1360	580	153	179	313	196
Karbónat (CO ₂)	55,1	71,1	49,1	52,5	51,2	57,5
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	12,1	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Bór (B)	1,25	0,148	0,009	0,024	0,097	0,035
Kísill (SiO ₂)	631	86,7	26,3	19,6	44,2	20,2
Natríum (Na)	280	55,8	10,2	15,5	38,6	17,3
Kalíum (K)	38,8	6,75	1,38	1,59	1,95	1,65
Magnesíum (Mg)	0,07	11,3	5,56	6,48	7,17	6,93
Kalsíum (Ca)	3,65	49,3	11,5	10,3	11,9	11,6
Flúoríð (F)	1,92	0,26	0,21	0,19	0,24	0,19
Klóríð (Cl)	63,7	11,1	3,78	4,62	9,72	5,03
Brómíð (Br)	0,11	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
Súlfat (SO ₄)	276	171	11,5	11,6	67,7	13,4
Ál (Al)	1,52	0,0286	0,00477	0,00426	0,130	0,00597
Arsen (As)	0,0358	0,00555	0,000399	0,000117	0,00267	0,000163
Baríum (Ba)	0,00151	0,00166	0,000272	0,000176	0,000553	0,000311
Kadmíum (Cd)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002	0,00000609	<0,000002
Kóbalt (Co)	0,0000334	0,000143	<0,000005	<0,000005	0,00000525	<0,000005
Króm (Cr)	0,0000736	0,000220	0,000448	0,000721	0,000468	0,000928
Kopar (Cu)	0,000397	0,000124	0,000444	0,000495	0,000656	0,000537
Járn (Fe)	0,0324	0,0142	0,00191	0,00182	0,0323	0,00601
Kvikasilfur (Hg)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Lítíum (Li)	0,24	0,03	<0,01	<0,01	0,02	<0,01
Mangan (Mn)	0,00485	0,0273	0,00193	0,000100	0,00232	0,000570
Mólybden (Mo)	0,00446	0,000796	0,000305	0,000557	0,00143	0,000602
Nikkel (Ni)	0,000249	0,00138	0,0000931	<0,00005	0,000228	0,0000907
Fosfór (P)	<0,001	0,0240	0,0601	0,0564	0,0336	0,0527
Blý (Pb)	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	0,0000111	<0,00001
Strontíum (Sr)	0,0172	0,0551	0,0123	0,0110	0,0150	0,0129
Vanadíum (V)	0,00230	0,0131	0,0200	0,0289	0,00914	0,0269
Sink (Zn)	0,00821	0,000246	0,00132	0,000368	0,000431	0,000238
Uppleyst steinefni (UE)	1525	441	89	113	234	121
δD (‰ SMOW)	-80,0	-77,6	-90,1	-91,5	-80,7	-91,9
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-8,93	-9,90	-12,49	-12,64	-10,76	-12,67

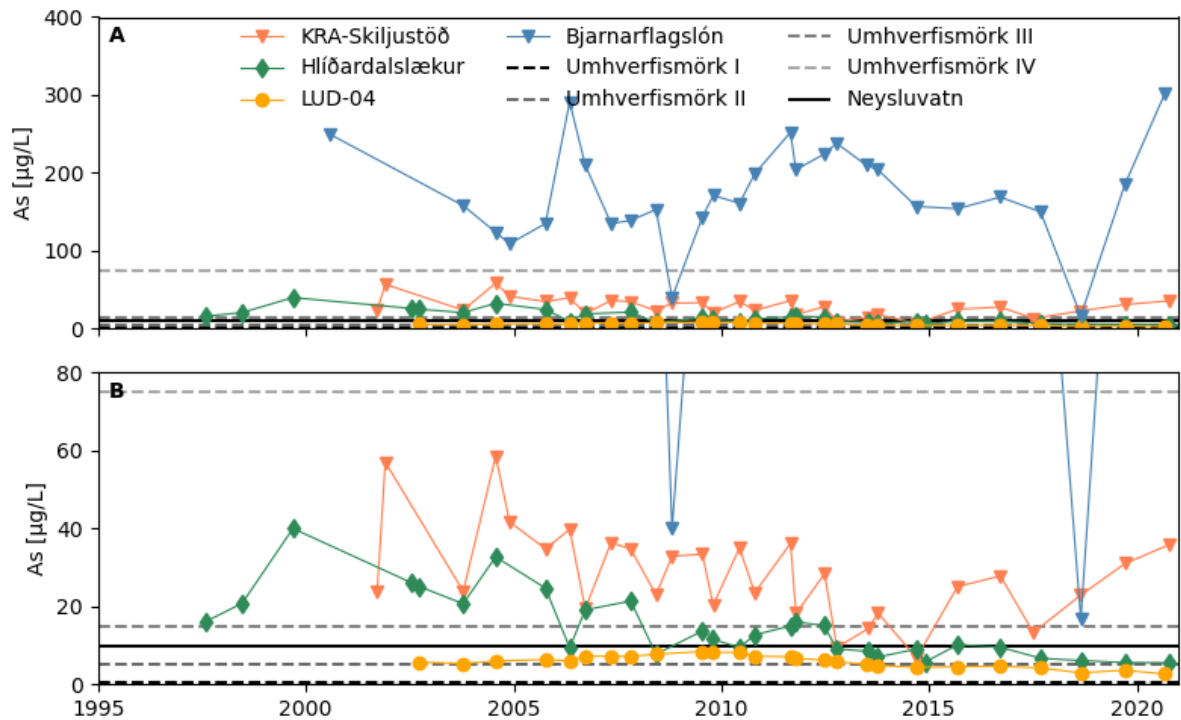
Tafla 5. (Frh.). Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum haustið 2020. Styrkur efna er í mg/L.

Staðarnafn	LUD-6	Bjarnarflagslón	Bjarg	Stóragjá	Vogagjá
Staður	B-58506	M-20004	H-10080	H-10083	H-10087
Dagsetning	2020-09-03	2020-09-04	2020-08-31	2020-08-31	2020-09-01
Sýnanúmer	20200166	20200169	20200149	20200153	20200159
Hitastig (°C)	32,1	12,6	19,3	25,8	39,6
Sýrustig (pH/°C) - ÍSOR	8,27 / 20,8	8,89 / 21,3	8,16 / 21,5	8,35 / 21,6	8,57 / 18,2
Sýrustig (pH/°C) - Felt	8,27 / 32,1	9,03 / 12,6	8,36 / 19,3	8,39 / 25,8	8,29 / 39,6
Leiðni við 25°C (µS/cm)	385	781	300	440	503
Karbónat (CO ₂)	106,8	33,6	69,2	97,8	73,9
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Bór (B)	0,053	3,34	0,069	0,112	0,285
Kísill (SiO ₂)	59,9	599	53,3	77,3	140
Natríum (Na)	48,6	148	40,7	59,0	83,9
Kalíum (K)	5,64	29,3	2,94	5,52	6,33
Magnesíum (Mg)	7,08	1,80	3,39	4,81	2,24
Kalsíum (Ca)	17,8	3,94	14,4	23,7	14,3
Flúoríð (F)	0,25	0,63	0,25	0,27	0,37
Klóríð (Cl)	5,05	108	9,22	9,76	16,5
Brómíð (Br)	0,01	0,33	0,03	0,03	0,04
Súlfat (SO ₄)	57,5	123	41,6	77,4	112
Ál (Al)	0,00584	1,33	0,00727	0,0165	0,0131
Arsen (As)	0,0000581	0,302	0,000198	0,000190	<0,00005
Baríum (Ba)	0,00325	0,000668	0,00064	0,00167	0,00162
Kadmíum (Cd)	<0,000002	0,00000233	0,00000467	<0,000002	<0,000002
Kóbalt (Co)	<0,000005	0,0000282	0,0000112	0,00000506	<0,000005
Króm (Cr)	0,000114	0,000177	0,00055	0,000409	0,000116
Kopar (Cu)	0,000117	0,000728	0,00114	0,000677	0,000404
Járn (Fe)	0,00806	0,0375	0,00124	0,000434	0,000405
Kvikasilfur (Hg)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Lítíum (Li)	<0,01	0,17	<0,01	0,01	0,01
Mangan (Mn)	0,000664	0,00667	0,000898	0,0000454	0,0000508
Mólybden (Mo)	0,000775	0,000860	0,00101	0,000868	0,000222
Nikkel (Ni)	<0,00005	0,0000889	0,0000903	<0,00005	0,0000542
Fosfór (P)	0,0306	0,00424	0,0784	0,0304	0,0185
Blý (Pb)	<0,00001	0,0000194	<0,00001	<0,00001	0,0000132
Strontíum (Sr)	0,0517	<0,01	0,0230	0,0347	0,0190
Vanadíum (V)	0,00620	0,00341	0,0242	0,0234	0,00640
Sink (Zn)	0,000208	0,000933	0,00175	0,00158	0,000836
Uppleyst steinefni (UE)	252	1136	196	331	443
δD (‰ SMOW)	-93,0	-87,0	-90,7	-88,0	-91,5
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-12,5	-7,14	-12,48	-12,06	-11,68

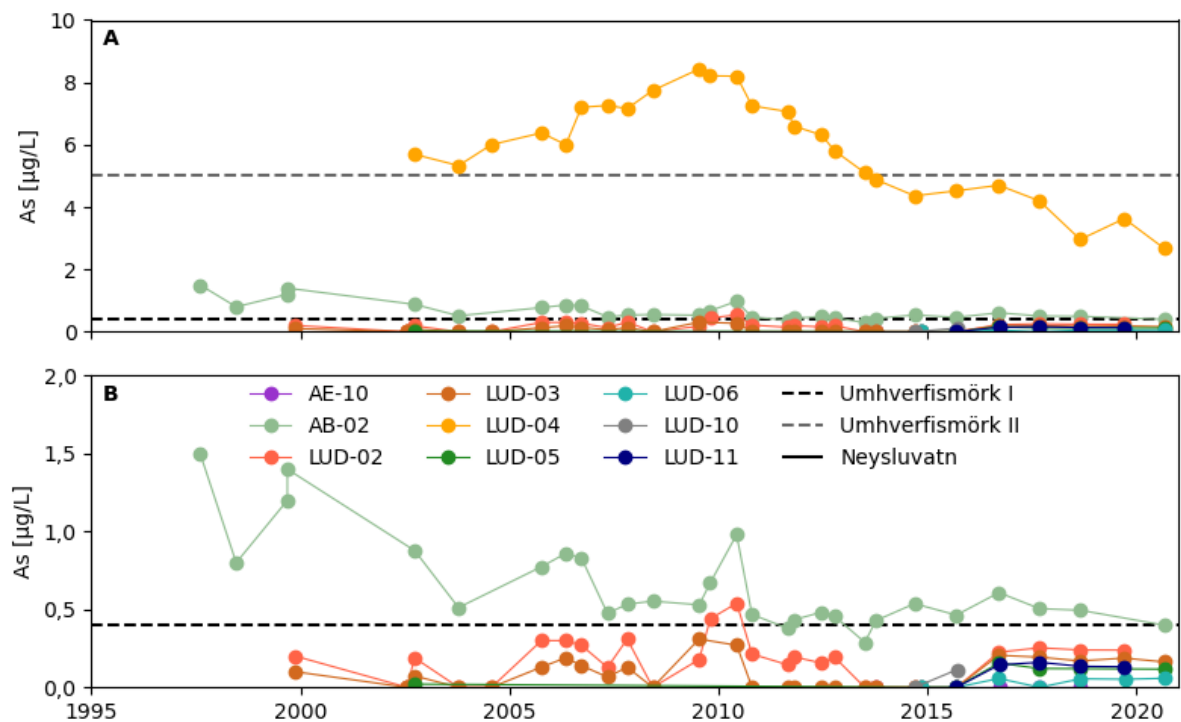
Tafla 5. (Frh.). Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum haustið 2020. Styrkur efna er í mg/L.

Staðarnafn	Grjótagjá	Langivogur	Vogaflói	Hverfjallsgjá	Garðslind
Staður	H-10085	H-10088	K-558	K-559	K-556
Dagsetning	2020-09-03	2020-09-01	2020-08-31	2020-09-03	2020-09-03
Sýnanúmer	20200170	20200160	20200151	20200167	20200168
Hitastig (°C)	44,3	21,0	6,2	5,7	5,3
Sýrustig (pH/°C) - ÍSOR	8,4 / 21,3	8,52 / 23,0	8,82 / 21,4	8,46 / 21,2	8,88 / 21,6
Sýrustig (pH/°C) - Felt	8,13 / 44,3	8,54 / 21,0	8,87 / 6,2	8,66 / 5,7	9,07 / 5,3
Leiðni við 25°C (µS/cm)	491	455	208	218	155
Karbonsat (CO ₂)	83,6	75,3	53,3	61,9	47,7
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Bór (B)	0,339 ^a	0,238	0,038	0,042	0,013
Kísill (SiO ₂)	151 ^a	117	20,4	23,6	19,2
Natríum (Na)	82,2 ^a	72,6	22,1	22,7	18,8
Kalíum (K)	7,25 ^a	5,56	1,46	1,93	1,33
Magnesíum (Mg)	2,33 ^a	3,27	5,75	6,55	4,49
Kalsíum (Ca)	13,0 ^a	14,1	10,7	12,0	7,12
Flúoríð (F)	0,41	0,35	0,22	0,21	0,20
Klóríð (Cl)	19,3	14,4	4,39	4,79	1,90
Brómíð (Br)	0,05	0,04	0,01	0,01	0,01
Súlfat (SO ₄)	93,0	95,0	21,7	22,6	7,84
Ál (Al)	0,0412	0,00707	0,00560	0,00597	0,0105
Arsen (As)	<0,00005	<0,00005	0,000185	0,000188	0,000103
Baríum (Ba)	0,00208	0,00147	0,000279	0,000261	0,000148
Kadmíum (Cd)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	0,00000266	<0,000002
Kóbalt (Co)	<0,000005	<0,000005	0,00000523	<0,000005	<0,000005
Krómm (Cr)	<0,00001	0,000292	0,00139	0,00119	0,00107
Kopar (Cu)	0,000302	0,000331	0,000870	0,00128	0,000241
Járn (Fe)	0,00135	0,000728	0,000646	0,000576	<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)	0,00386	0,000044	<0,00003	0,0000613	<0,00003
Mólybden (Mo)	0,000197	0,000320	0,000741	0,000684	0,000665
Nikkel (Ni)	<0,00005	<0,00005	<0,00005	<0,00005	<0,00005
Fosfór (P)	0,0195	0,0241	0,0560	0,0525	0,0600
Blý (Pb)	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001
Strontíum (Sr)	0,0200	0,0198	0,0136	0,0152	0,00871
Vanadíum (V)	0,000729	0,0111	0,0398	0,0337	0,0354
Sink (Zn)	0,000361	0,000803	0,000348	0,000593	<0,0002
Uppleyst steinefni (UE)	407	374	126	130	91
δD (‰ SMOW)	-91,6	-91,0	-92,3	-92,4	-94,0
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-11,53	-11,74	-12,66	-12,70	-12,94

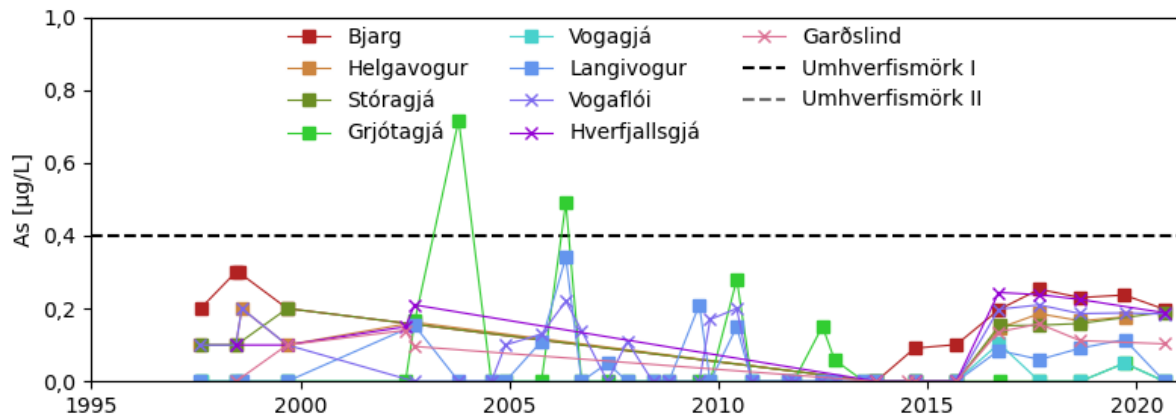
^a Mæling frá ALS Laboratories



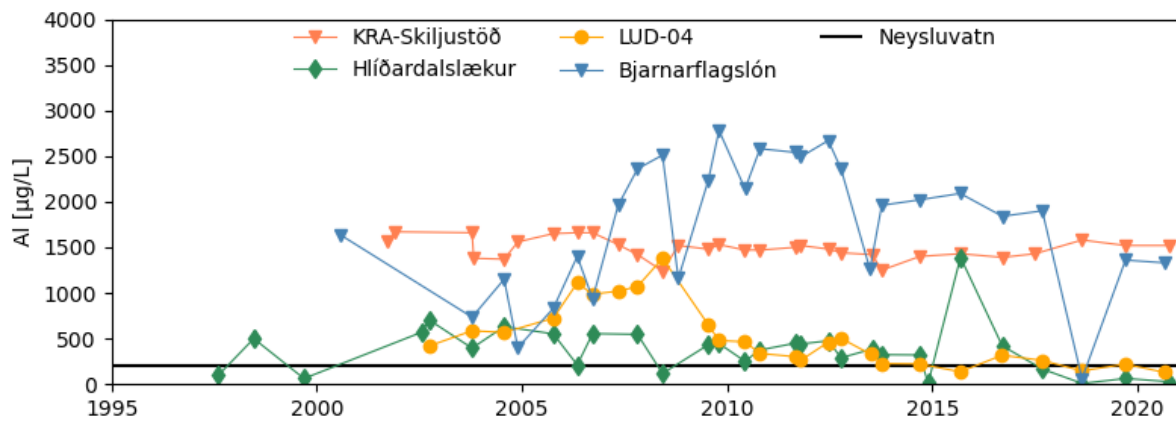
Mynd 43. (A) Styrkur arsens í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt umhverfismörkum I, II, III og IV og mörkum fyrir neysluvatn (10 µg/L). (B) Sama mynd með smærri kvarða til betri aðgreiningar á niðurstöðum.



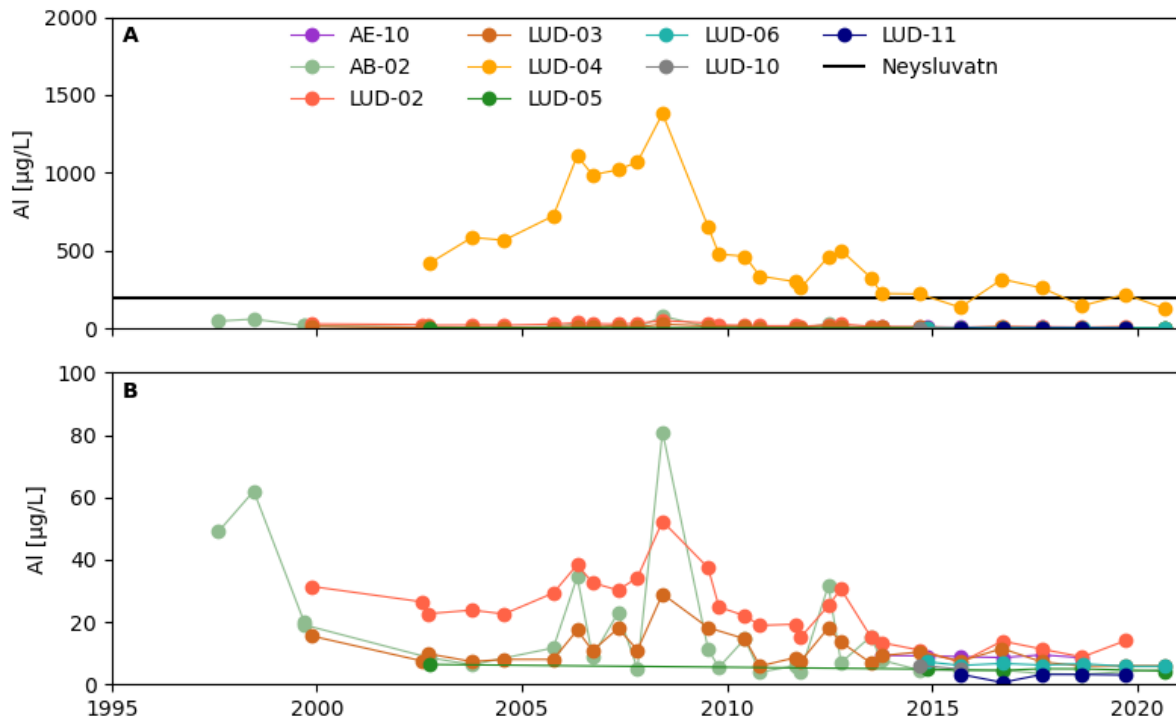
Mynd 44. (A) Styrkur arsens í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I og II. Viðmiðunarmörk fyrir styrk arsens í neysluvatni (10 µg/L) eru efst á myndinni. (B) Niðurstöðum fyrir LUD-4 hefur verið sleppt til betri aðgreiningar á niðurstöðum.



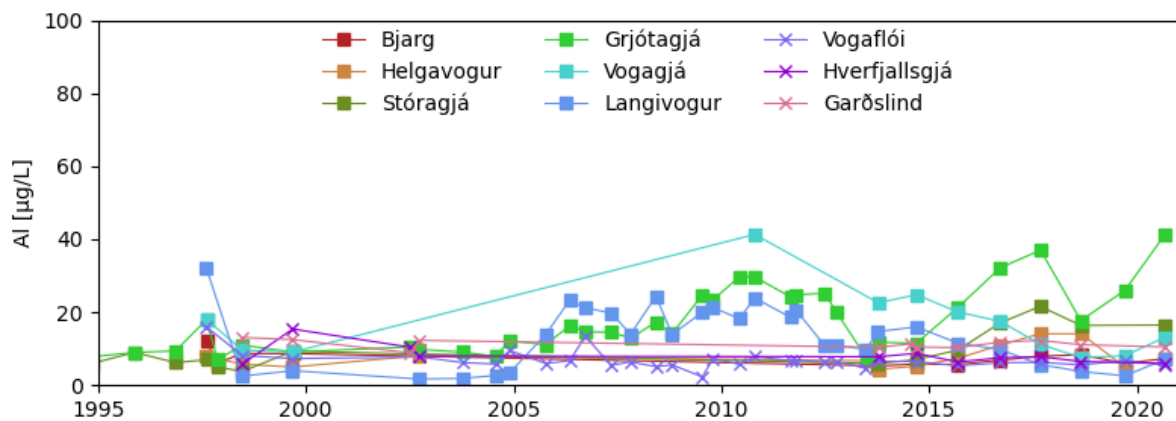
Mynd 45. Styrkur arsens í lindum við Mývatn ásamt umhverfismörkum I (0,4 $\mu\text{g/L}$).



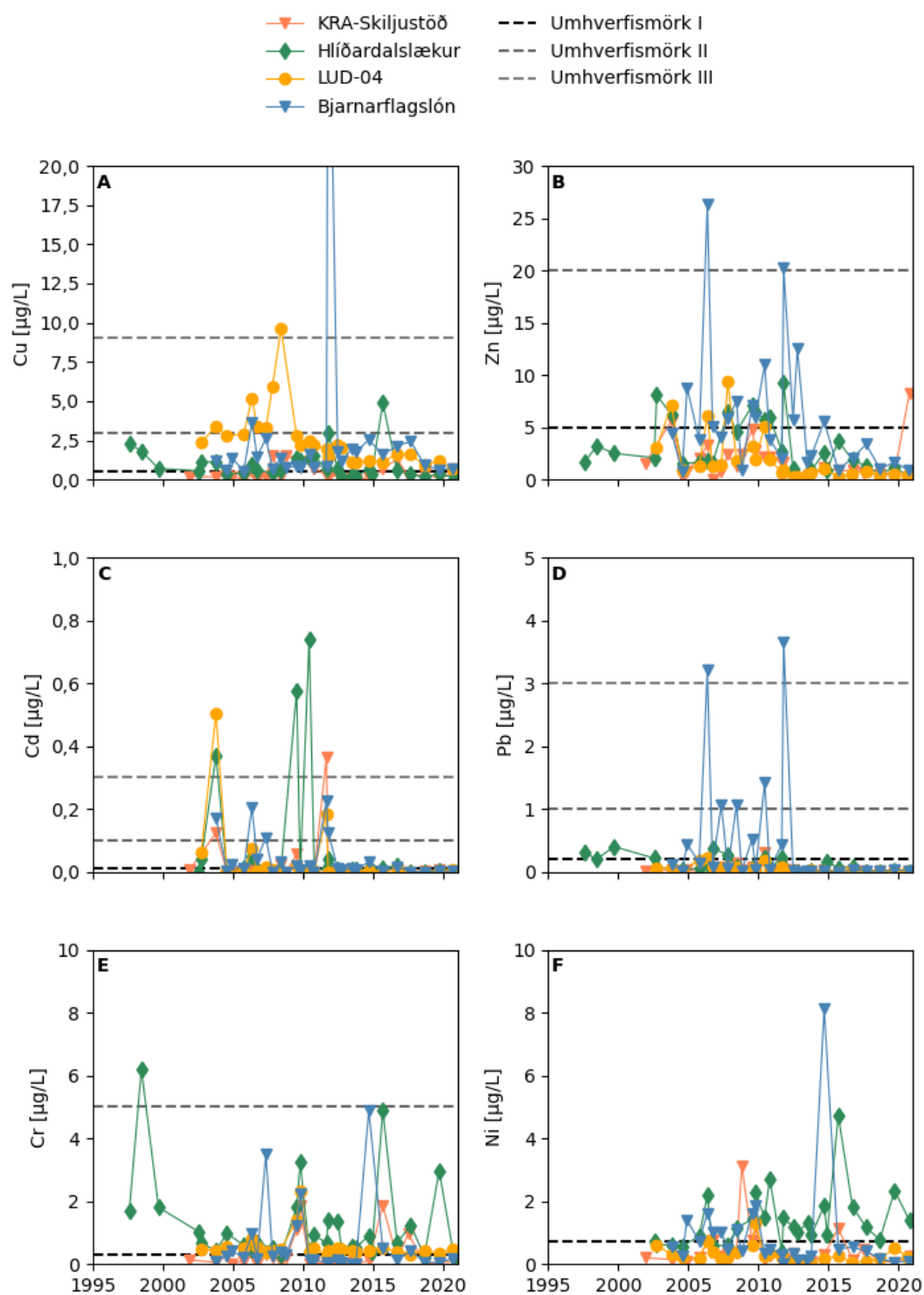
Mynd 46. Styrkur áls í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt viðmiðunarmörkum fyrir neysluvatn (200 $\mu\text{g/L}$).



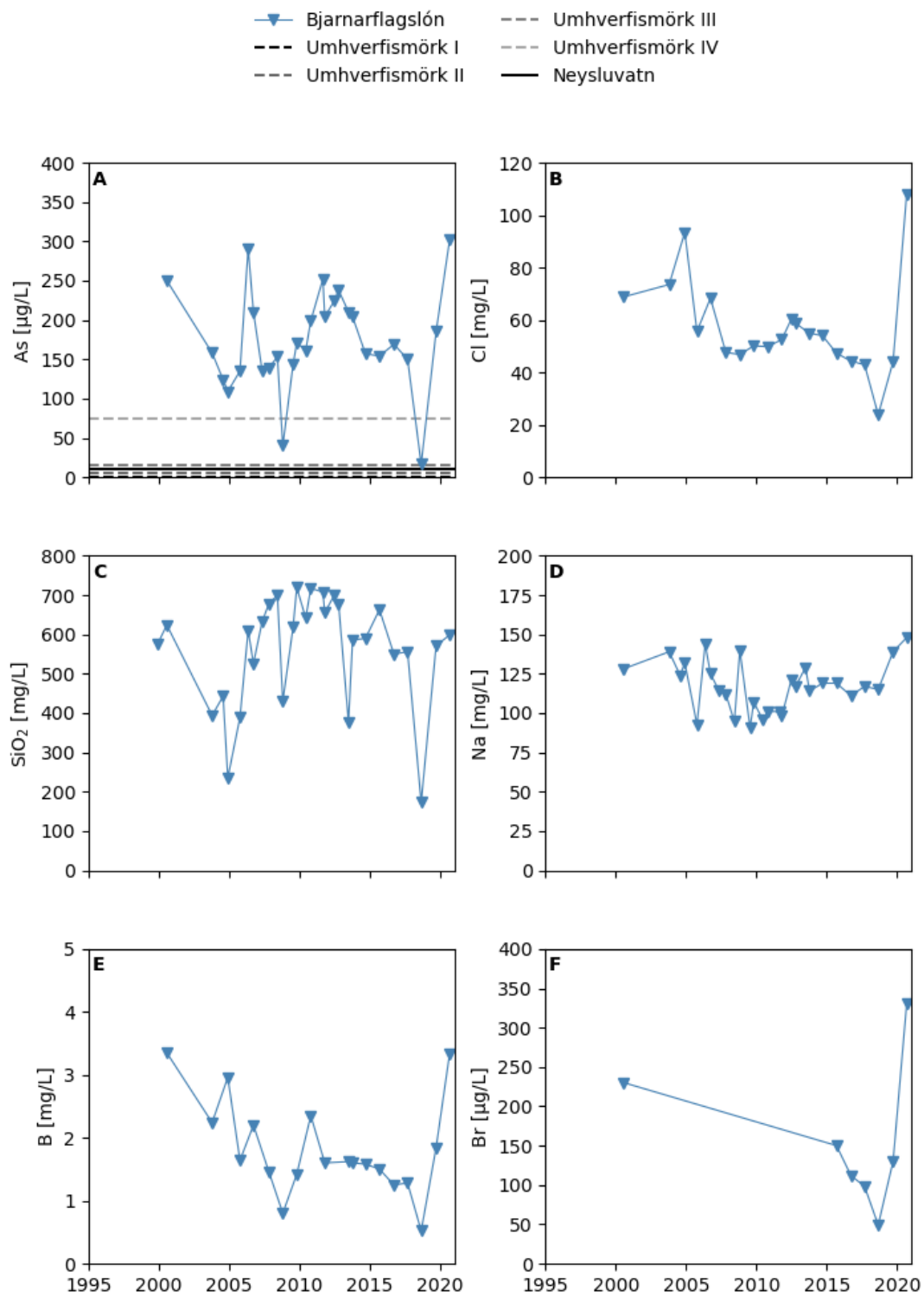
Mynd 47. (A) Styrkur áls í vatni úr borholum ásamt viðmiðunarmörkum fyrir neysluvatn (200 µg/L). (B) Niðurstöðum fyrir LUD-4 hefur verið sleppt til betri aðgreiningar á niðurstöðum.



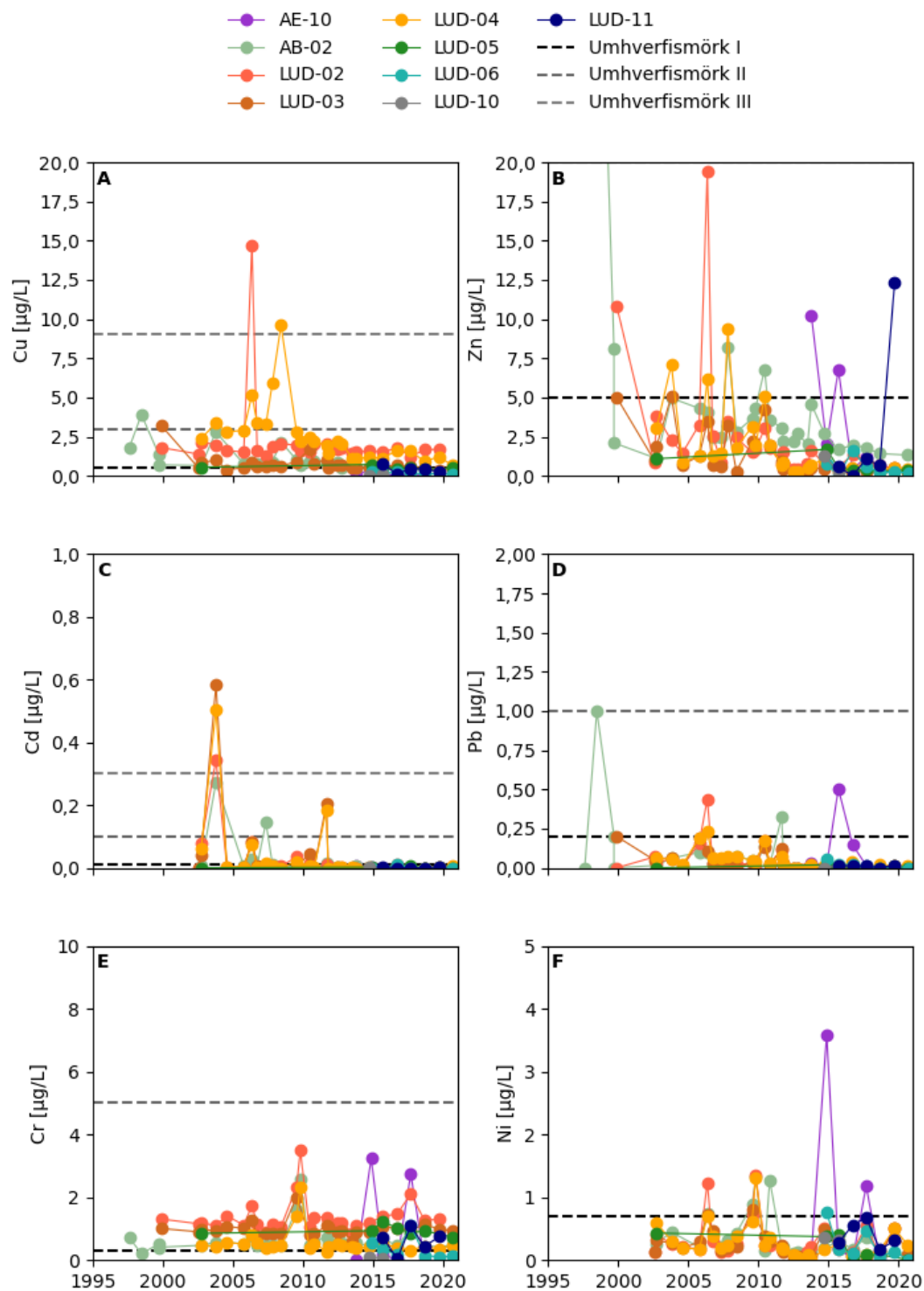
Mynd 48. Styrkur áls í vatni í lindum við Mývatn. Neysluvatnsmörk (200 µg/L) falla utan kvarða myndarinnar.



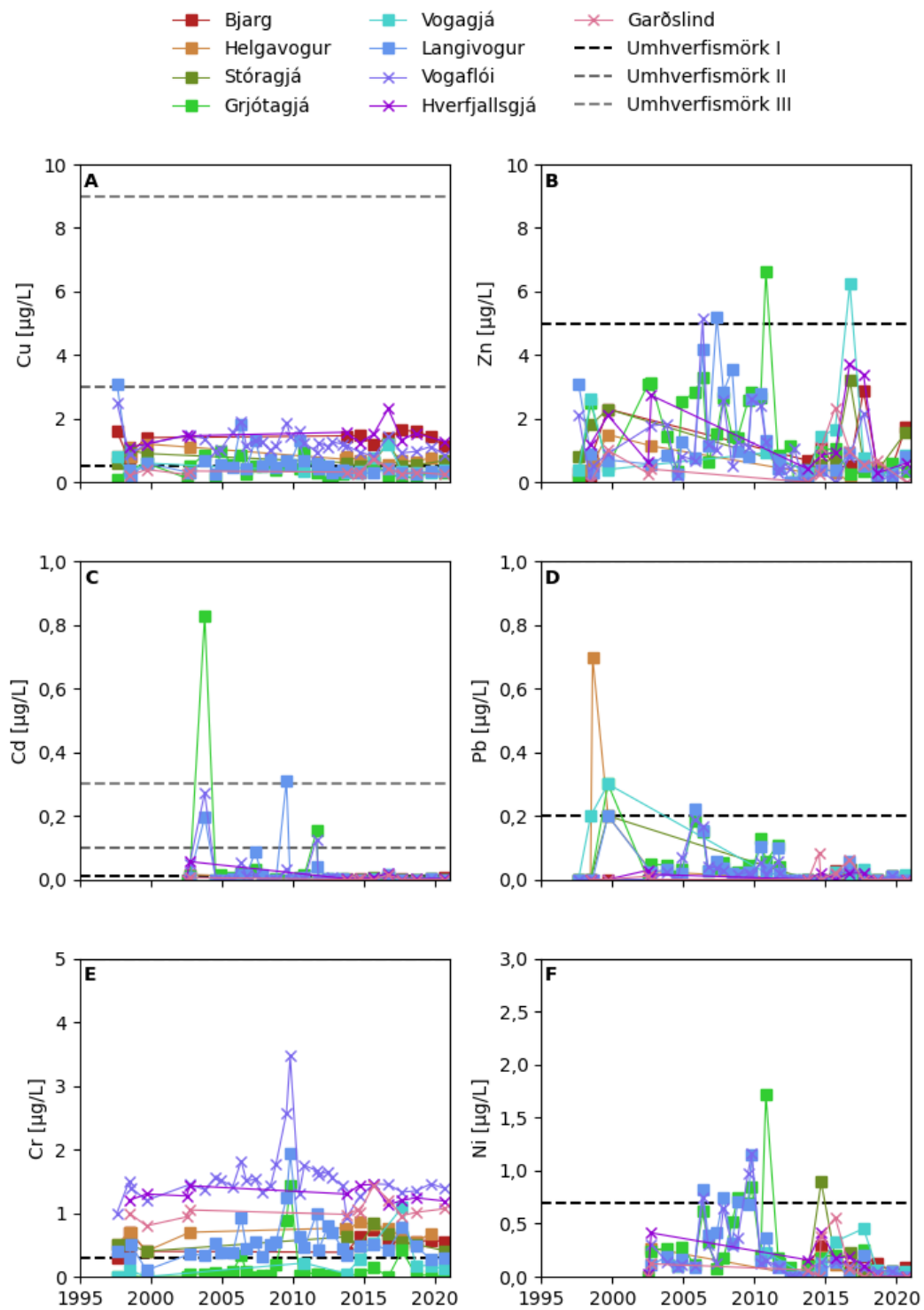
Mynd 49. Styrkur kopars (A), sínks (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni frá skiljustöð í Kröflu, Hlíðardalslæk, LUD-4 og Bjarnarflagslóni ásamt umhverfismörkum I, II og III.



Mynd 50. Styrkur arsens (A), klóríðs (B), kísils (C), natríums (D), bórs (E) og brómíðs (F) í vatni frá Bjarnarflaglóni. Aðeins As hefur umhverfismörk.



Mynd 51. Styrkur kopars (A), sínks (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr borholum ásamt umhverfismörkum I, II og III.



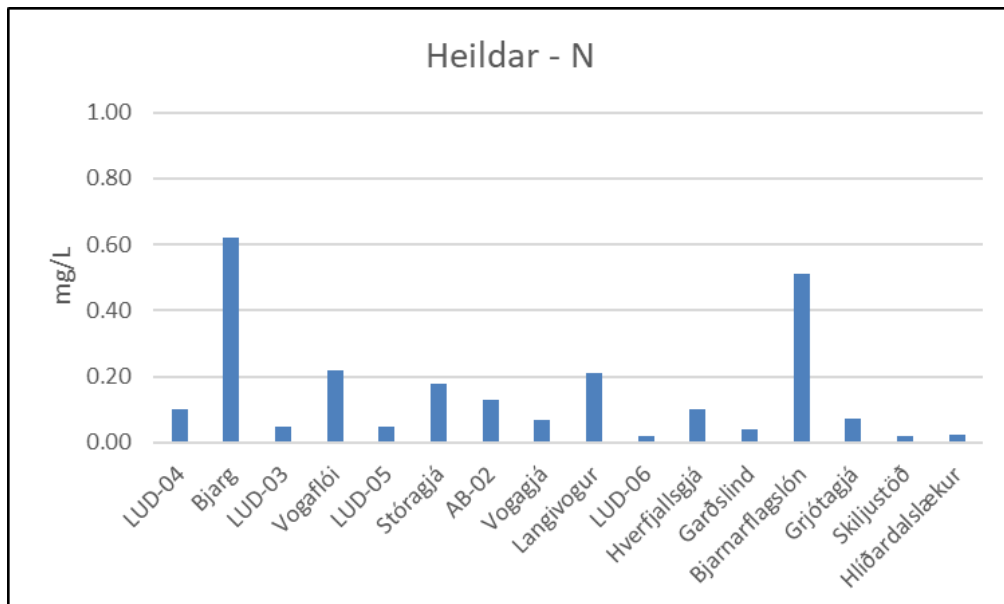
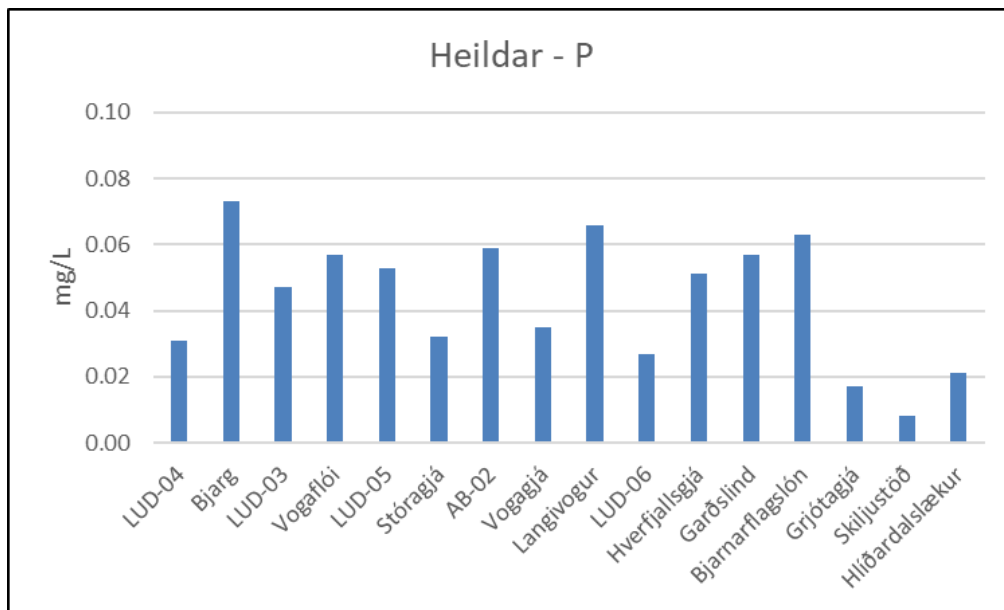
Mynd 52. Styrkur kopars (A), sínks (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr lindum ásamt umhverfismörkum I, II og III.

3.2 Næringarefni í sýnum úr Mývatnssveit

Að beiðni Landsvirkjunar var sérstökum sýnum safnað samhliða sýnatöku haustið 2020 á öllum sýnatökustöðum í Mývatnssveit til greininga á næringarefnum (köfnunarefni (N) og fosfór (P)). Niðurstöður eru sýndar í töflu 6. Niðurstöður sams konar sýnatöku og efna- greininga á næringarefnum haustin 2017 og 2019 sýndu að styrkur þeirra mældist hæstur í lind neðan við Bjarg (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2017; Finnbogi Óskarsson o.fl., 2019). Niðurstöður nú sýna einnig að styrkur nitrats, ammóníaks og heildar-N er hæstur við Bjarg, eins og vel kemur fram á mynd 53, og þar mælist fosfatstyrkur einnig hæstur. Bjarnarflaglón er með næsthæsta heildar-N þótt styrkur allra þriggja köfnunarefnisformanna sem greind voru mælist lágur. Í lindinni við Bjarg virðist köfnunarefni hins vegar að langmestu leyti vera á formi nitrats.

Tafla 6. Niðurstöður efna- greininga á næringarefnum í sýnum úr Mývatnssveit (mg/L).

Staður	Sýni	Nítrat-N (NO ₃ -N)	Nítrít-N (NO ₂ -N)	Ammóníak-N (NH ₃ -N)	Heildar -N	Fosfat-P (PO ₄ -P)	Heildar-P
LUD-4	20200148	0,073	<0,0005	0,008	0,10	0,035	0,031
Bjarg	20200149	0,62	0,0010	0,026	0,62	0,080	0,073
LUD-3	20200150	0,067	<0,0005	0,008	0,050	0,049	0,047
Vogaflói	20200151	0,053	<0,0005	<0,003	0,22	0,062	0,057
LUD-5	20200152	0,070	<0,0005	0,007	0,048	0,062	0,053
Stóragjá	20200153	0,16	<0,0005	0,010	0,18	0,024	0,032
AB-2	20200158	0,12	<0,0005	0,006	0,13	0,066	0,059
Vogagjá	20200159	0,052	<0,0005	0,006	0,070	0,027	0,035
Langivogur	20200160	0,061	<0,0005	0,009	0,21	0,062	0,066
LUD-6	20200166	<0,03	<0,0005	<0,003	<0,02	0,036	0,027
Hverfjallsgjá	20200167	0,053	<0,0005	0,004	0,10	0,053	0,051
Garðslind	20200168	0,034	<0,0005	<0,003	0,041	0,061	0,057
Bjarnarflaglón	20200169	<0,03	<0,0005	0,014	0,51	0,058	0,063
Grjótagjá	20200170	<0,03	<0,0005	0,025	0,073	0,021	0,017
Skiljustöð	20200200	<0,03	<0,0005	<0,003	0,020	0,011	0,008
Hlíðardalslækur	20200203	<0,03	<0,0005	0,010	0,022	0,024	0,021



Mynd 53. Styrkur köfnunarefnis og fosfats í sýnum úr Mývatnssveit.

3.3 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 2020 fór sýnataka á Þeistareykjum og Kelduhverfi fram á fyrstu dögum septembermánaðar. Fimm sýnum var safnað á Þeistareykjum en fjórum í Kelduhverfi.

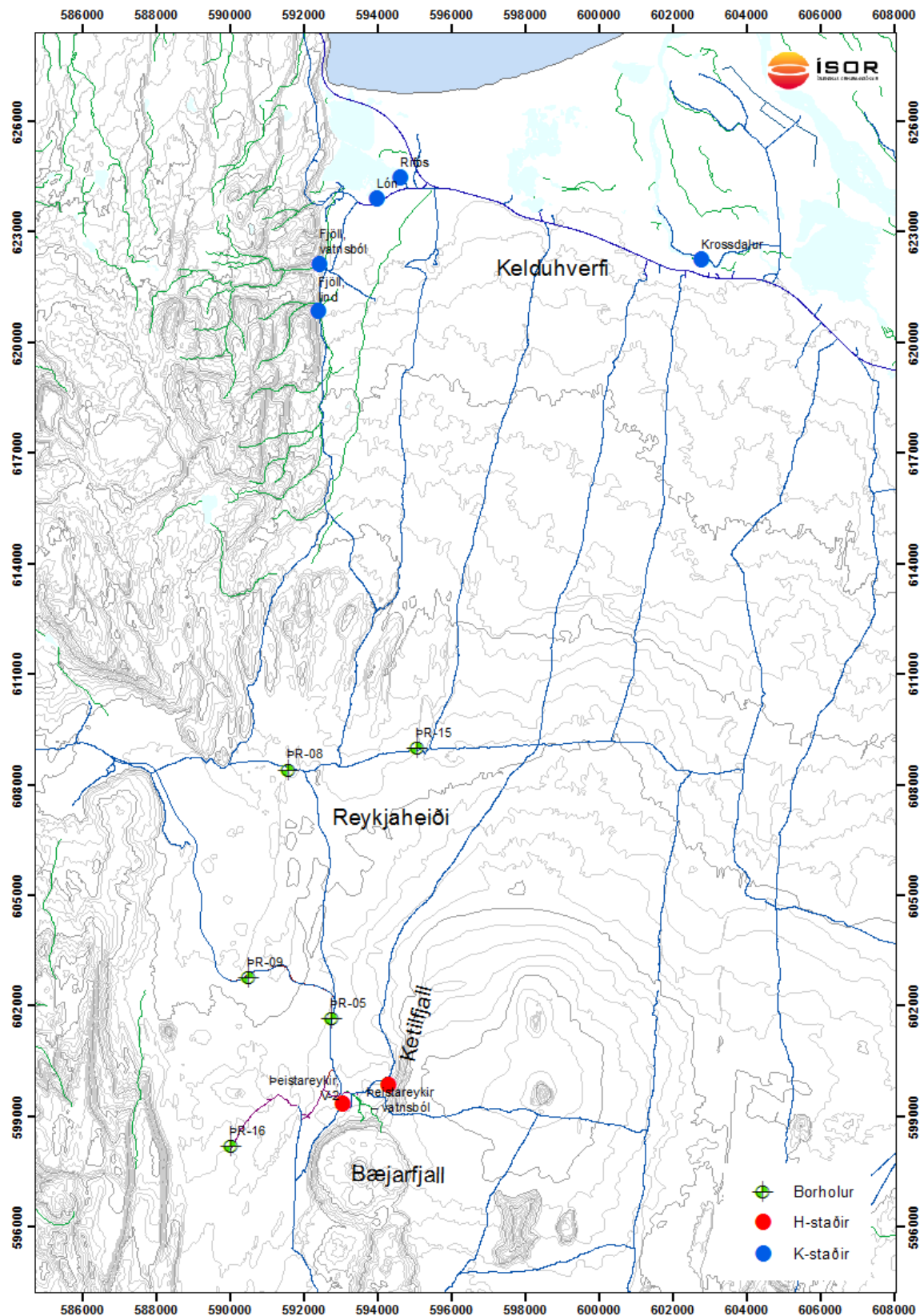
Í Kelduhverfi er sýnum safnað úr köldum og volgum lindum og á Þeistareykjum hafa sérstakar holur verið boraðar fyrir grunnvatnseftirlit. Einnig er sýnum safnað úr vatnsbóli Þeistareykja vestan undir Ketilfjalli en sýnataka úr uppsprettu við sæluhús hefur verið aflögð. Yfirlit um sýnatökustaðina er gefið í töflu 7 og þeir eru einnig sýndir á mynd 54. Að þessu sinni voru að ósk Landsvirkjunar ekki tekin sýni úr vatnsbóli við Fjöll í Kelduhverfi. Djúpdælur eru í vöktunarholum á Þeistareykjum og í töflu 7 er einnig yfirlit um þær og hve miklu var dælt úr hverri holu við sýnatöku haustið 2020. Hóla ÞR-9 er vatnstökuhóla fyrir Þeistareykjavirkjun og var í stöðugri dælingu á þeim tíma sem sýni var tekið líkt og verið hefur undanfarin ár.

Tafla 7. Vöktunarstaðir og yfirlit um dælt magn úr vöktunarholum á Þeistareykjum og í Kelduhverfi 2020.

Staður	Staðarnr.	Sýni nr.	Dagsetning	Magn	Rennsli	Hitastig	Hnit	
				(L)	(L/s)	(°C)	X	Y
Þeistareykir-vatnsból	M-20409	2020016	2.9.2020			16,8	5	599848
ÞR-8	B-60368	2020016	2.9.2020	2700	0,60	1,7	5	608366
ÞR-9	B-60369	2020016	2.9.2020			7,3	5	602733
ÞR-15	B-60376	2020016	2.9.2020	2394	0,38	16,0	5	608951
ÞR-16	B-60377	2020016	2.9.2020	243 ^b	0,09	3,7	5	598150
Fjöll – vatnsból ^a	K-568						5	622118
Fjöll – lind	K-2742	2020015	1.9.2020			2,6	5	620833
Rífós- Tangabrunnur	K-2743	2020015	1.9.2020			10,3	5	624481
Lón	K-2744	2020015	1.9.2020			4,6	5	623909
Krossdalur	K-2745	2020015	1.9.2020			3,4	6	622250

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

^b Vegna vandræða með rafstöð náðist ekki að dæla meiru úr holu ÞR-16 fyrir sýnatöku.



Mynd 54. Sýnatökustaðir í Kelduhverfi og á Þeistareykjum. Borholur eru sýndar grænar með krossi. Volgar lindir eru rauðar og kaldar lindir bláar. Haustið 2020 var sýnum safnað á fimm stöðum á Þeistareykjum og fjórum í Kelduhverfi.

Niðurstöður efnagreininga úr Kelduhverfi og Þeistareykjum eru sýndar í töflum 8 og 9. Á mynd 55 eru sýndar niðurstöður fyrir styrk arsens og áls fyrir vöktunarstaði í Kelduhverfi og á mynd 57 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 í reglugerðum eru skráð í töflu 3 og sýnd á myndunum.

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

Niðurstöður mælinga á arseni og áli í Kelduhverfi (mynd 55) sýna engar marktækar breytingar milli ára 2019 og 2020. Fyrir arsen eru allar niðurstöður vel innan umhverfismarkna I ($0,4 \mu\text{g/L}$) og fyrir ál eru niðurstöður langt undir hámarksgildi fyrir neysluvatn ($200 \mu\text{g/L}$).

Niðurstöður greininga á styrk kopars, sínks, kadmíums, blýs, króms og nikkels eru sýndar á mynd 57. Fyrir kopar (mynd 57A) falla niðurstöður efnagreininga undanfarin ár við eða innan við umhverfismörk I ($0,5 \mu\text{g/L}$) og sama er að segja um sink, kadmíum og blý (myndir 57B-D). Styrkur kopar og sínks jókst lítillega við Rifós árið 2020 en styrkur kadmíums er alltaf innan greiningarmarkna ($0,002 \mu\text{g/L}$). Myndir 57E-F sýna að styrkur króms og nikkels í lindum í Kelduhverfi mælist nærri umhverfismörkum I ($0,3 \mu\text{g/L}$) fyrir króm en ávallt innan umhverfismarkna I ($0,7 \mu\text{g/L}$) fyrir nikkel. Haustið 2019 mældist styrkur þessara snefilmálma óvenjulega hár í sýninu frá Lóni en svo er ekki í ár.

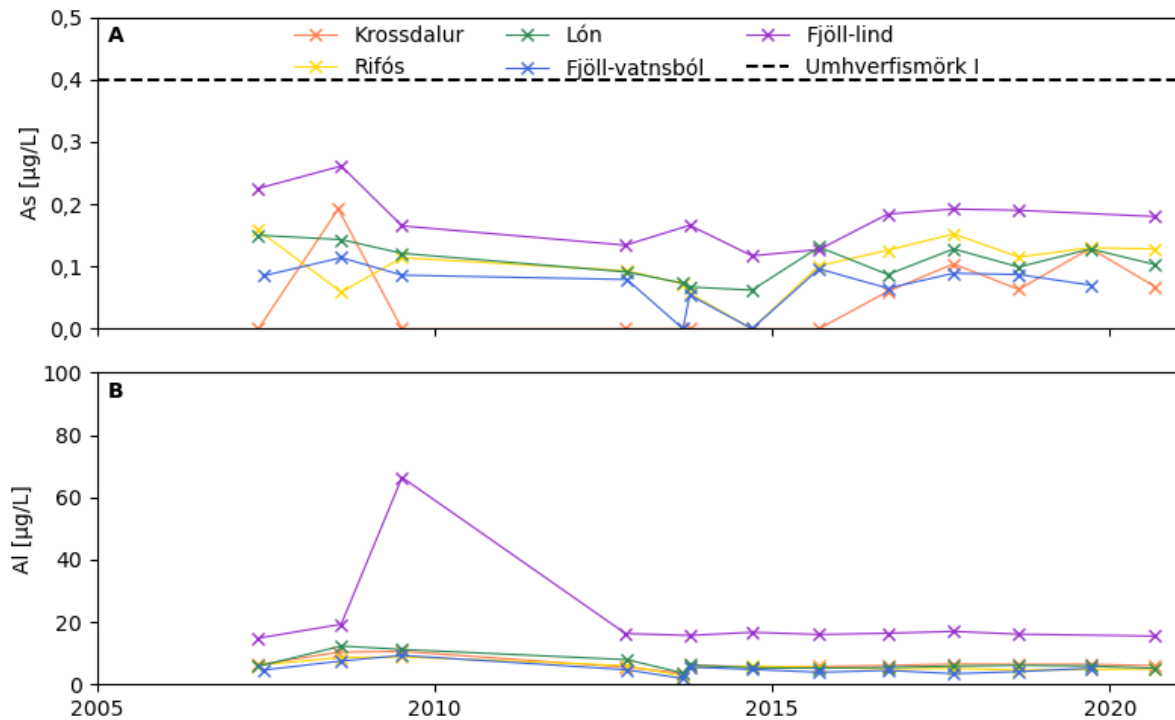
Mynd 56 sýna styrk arsens og áls í sýnum frá Þeistareykjum. Styrkur arsens mælist langt innan umhverfismarkna I ($0,4 \mu\text{g/L}$) og breytist ekkert milli ára. Sama má í raun segja um styrk áls, hann mælist langt innan viðmiðunarmarkna fyrir neysluvatn ($200 \mu\text{g/L}$) og breytist ekki mikið milli ára. Styrkur kopars (mynd 58A) mælist um og rétt yfir umhverfismörkum I ($0,5 \mu\text{g/L}$) og breytist ekki milli ára. Sama máli gegnir um sink (mynd 58B). Styrkur kadmíums (mynd 58C) mælist að venju innan umhverfismarkna I ($0,01 \mu\text{g/L}$) og greiningarmarkna og hefur ekki breyst milli ára. Sama máli gegnir um styrk blýs (mynd 58D) þar sem styrkur er á öllum stöðum innan umhverfismarkna I ($0,2 \mu\text{g/L}$). Styrkur króms (mynd 58E) mælist við eða rétt ofan umhverfismarkna I og styrkur nikkels (mynd 58F) mælist alls staðar innan umhverfismarkna I. Frávik frá þessari meginreglu hafa aðeins komið fram í sýnum í vatnsbóli Þeistareykjaskála, sem er volgt gufuhitað vatn, en þar voru ekki tekin sýni haustin 2019 og 2020.

Tafla 8. Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum á Þeistareykjum 2020. Styrkur efna í mg/L.

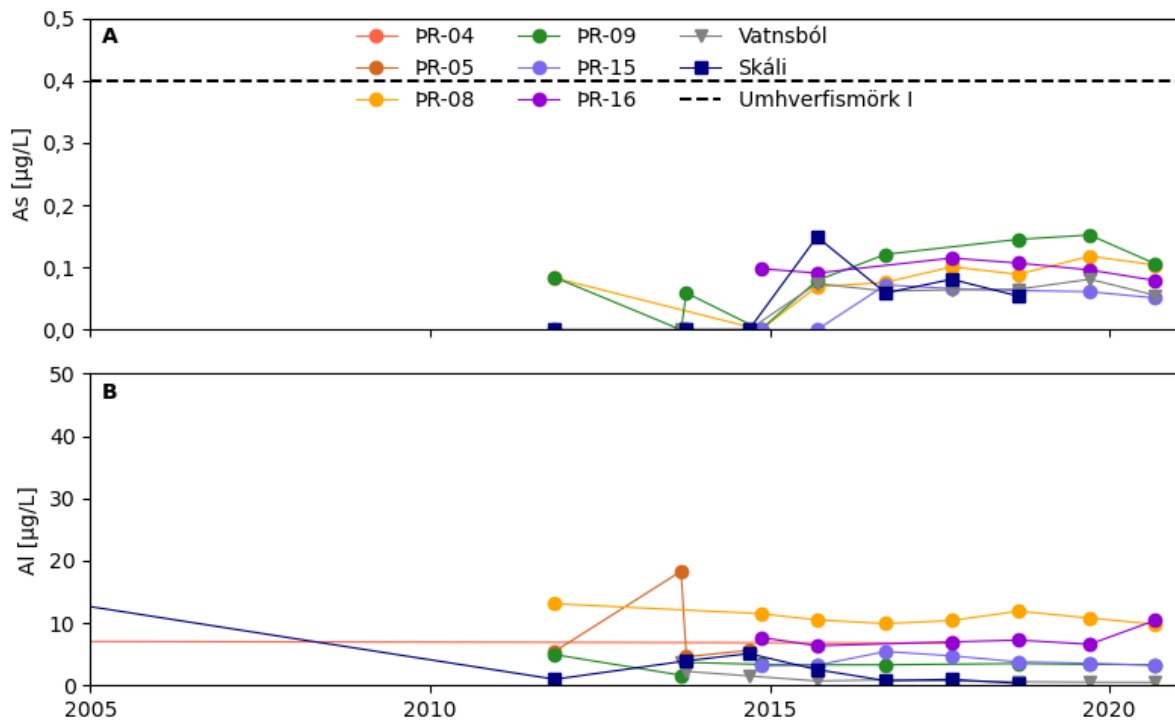
Staðarnafn	Vatnsból	ÞR-8	ÞR-9	ÞR-15	ÞR-16
Staður	M-20409	B-60368	B-60369	B-60376	B-60377
Dagsetning	2020-09-02	2020-09-02	2020-09-02	2020-09-02	2020-09-02
Sýnanúmer	20200164	20200163	20200162	20200161	20200165
Hitastig (°C)	16,8	1,7	7,3	16,0	3,7
Sýrustig (pH/°C) - ÍSOR	6,59 / 21,6	8,32 / 21,1	8,16 / 20,8	7,95 / 20,3	8,24 / 21,7
Sýrustig (pH/°C) - Felt	6,50 / 16,8	8,73 / 1,7	8,37 / 7,3	8,11 / 16,0	8,55 / 3,7
Leiðni við 25°C (µS/cm)	259	71,8	122	168	94,8
Karbónat (CO ₂)	165	14,7	32,7	45,3	28,6
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Bór (B)	<0,005	<0,005	0,005	0,016	0,005
Kísill (SiO ₂)	50,9	16,5	23,7	37,6	19,8
Natríum (Na)	16,5	7,68	11,2	15,2	9,86
Kalíum (K)	1,84	0,649	0,996	1,22	1,14
Magnesíum (Mg)	7,61	1,81	3,45	3,92	3,20
Kalsíum (Ca)	24,1	3,62	7,08	11,8	4,08
Flúoríð (F)	0,04	0,04	0,10	0,07	0,09
Klóríð (Cl)	5,29	6,64	5,72	7,68	5,43
Brómíð (Br)	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01
Súlfat (SO ₄)	12,8	1,79	9,60	14,1	2,10
Ál (Al)	0,000476	0,00981	0,00332	0,00319	0,0104
Arsen (As)	0,0000554	0,000104	0,000106	0,0000510	0,0000790
Baríum (Ba)	0,000797	0,0000463	0,0000314	0,000179	0,000350
Kadmíum (Cd)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Kóbalt (Co)	<0,000005	<0,000005	<0,000005	<0,000005	0,000012
Króm (Cr)	0,0000808	0,000351	0,000669	0,000540	0,000449
Kopar (Cu)	0,000210	0,000179	0,000774	0,000369	0,000503
Járn (Fe)	0,00130	0,00103	0,00134	0,00350	0,0405
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)	0,000743	0,0000320	0,0000790	0,000430	0,00438
Mólybden (Mo)	0,0000852	0,0000816	0,000167	0,000181	0,000156
Nikkel (Ni)	0,000255	0,000223	0,000146	0,000139	0,000281
Fosfór (P)	0,0341	0,0412	0,0774	0,0490	0,0373
Blý (Pb)	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001	0,0000141
Strontíum (Sr)	0,0267	0,00500	0,00733	0,0143	0,00488
Vanadíum (V)	0,00996	0,0114	0,0352	0,0168	0,0144
Sink (Zn)	0,000748	0,000553	0,000570	0,00109	0,00302
Uppleyst steinefni (UE)	170	48	81	136	53
δD (‰ SMOW)	-72,1	-73,8	-81,2	-76,0	-82,8
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-10,33	-10,76	-11,62	-10,78	-11,81

Tafla 9. Niðurstöður efnagreininga á vöktunarstöðum í Kelduhverfi 2020. Styrkur efna í mg/L.

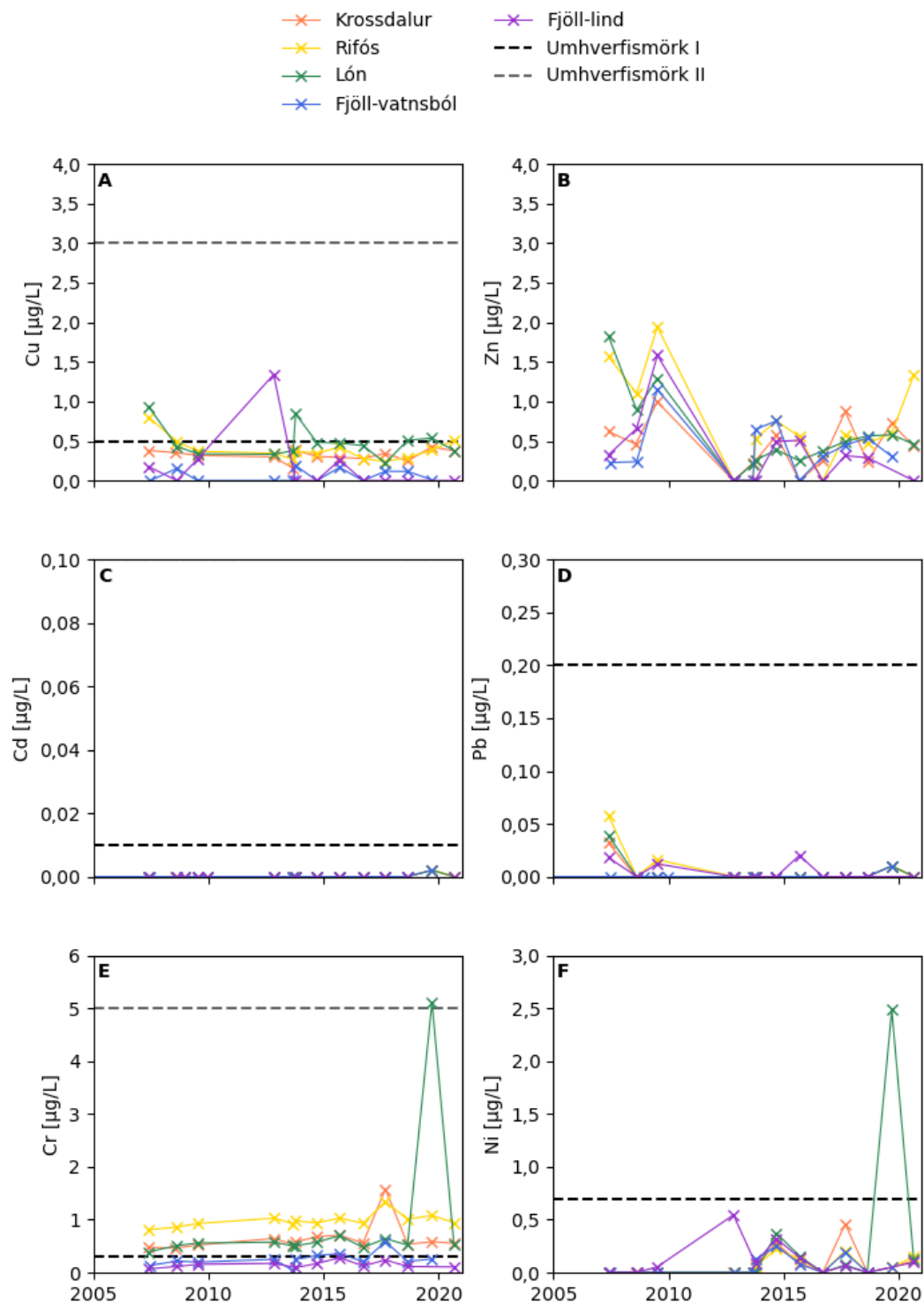
Staðarnafn	Krossdalur	Rífós	Lón	Fjöll, lind
Staður	K-2745	K-2743	K-2744	K-2742
Dagsetning	2020-09-01	2020-09-01	2020-09-01	2020-09-01
Sýnanúmer	20200154	20200155	20200156	20200157
Hitastig (°C)	3,4	10,3	4,6	2,6
Sýrustig (pH/°C) - ÍSOR	8,48 / 21,3	8,07 / 21,8	7,8 / 21,7	9,73 / 21,2
Sýrustig (pH/°C) - Felt	8,70 / 3,4	8,25 / 10,3	7,96 / 4,6	9,94 / 2,6
Leiðni við 25°C (µS/cm)	106	150	93,6	101
Karbonsat (CO ₂)	22,7	37,2	24,5	14,4
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	<0,03	<0,03	<0,03	<0,03
Bór (B)	<0,005	0,013	0,007	0,008
Kísill (SiO ₂)	20,3	29,0	19,6	9,09
Natríum (Na)	10,7	17,8	10,1	18,1
Kalíum (K)	0,794	1,23	0,876	0,049
Magnesíum (Mg)	2,74	3,55	2,64	0,040
Kalsíum (Ca)	5,94	6,88	4,53	2,72
Flúoríð (F)	0,10	0,10	0,07	0,03
Klóríð (Cl)	8,15	11,0	7,22	7,37
Brómíð (Br)	0,02	0,03	0,02	0,02
Súlfat (SO ₄)	4,38	9,66	2,90	4,22
Ál (Al)	0,00595	0,00500	0,00515	0,0155
Arsen (As)	0,0000676	0,000128	0,000103	0,000180
Baríum (Ba)	0,0000586	0,000104	0,0000823	<0,00001
Kadmíum (Cd)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Kóbalt (Co)	0,00000558	<0,000005	<0,000005	<0,000005
Króm (Cr)	0,000554	0,000946	0,000534	0,000105
Kopar (Cu)	0,000374	0,000513	0,000379	<0,0001
Járn (Fe)	0,000549	0,000438	<0,0004	<0,0004
Kvikasilfur (Hg)	<0,000002	<0,000002	<0,000002	<0,000002
Lítíum (Li)	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Mangan (Mn)	0,000108	0,0000336	<0,00003	<0,00003
Mólybden (Mo)	0,000148	0,000215	0,000182	0,000151
Nikkel (Ni)	0,000112	0,000150	0,000123	0,0000964
Fosfór (P)	0,0626	0,0798	0,0573	0,0104
Blý (Pb)	<0,00001	<0,00001	<0,00001	<0,00001
Strontíum (Sr)	0,00820	0,0110	0,00588	<0,002
Vanadíum (V)	0,0286	0,0330	0,0208	0,0126
Sink (Zn)	0,000433	0,00133	0,000461	<0,0002
Uppleyst steinefni (UE)	80	103	58	49
δD (‰ SMOW)	-75,5	-80,2	-76,2	-71,6
δ ¹⁸ O (‰ SMOW)	-10,87	-11,44	-10,91	-10,47



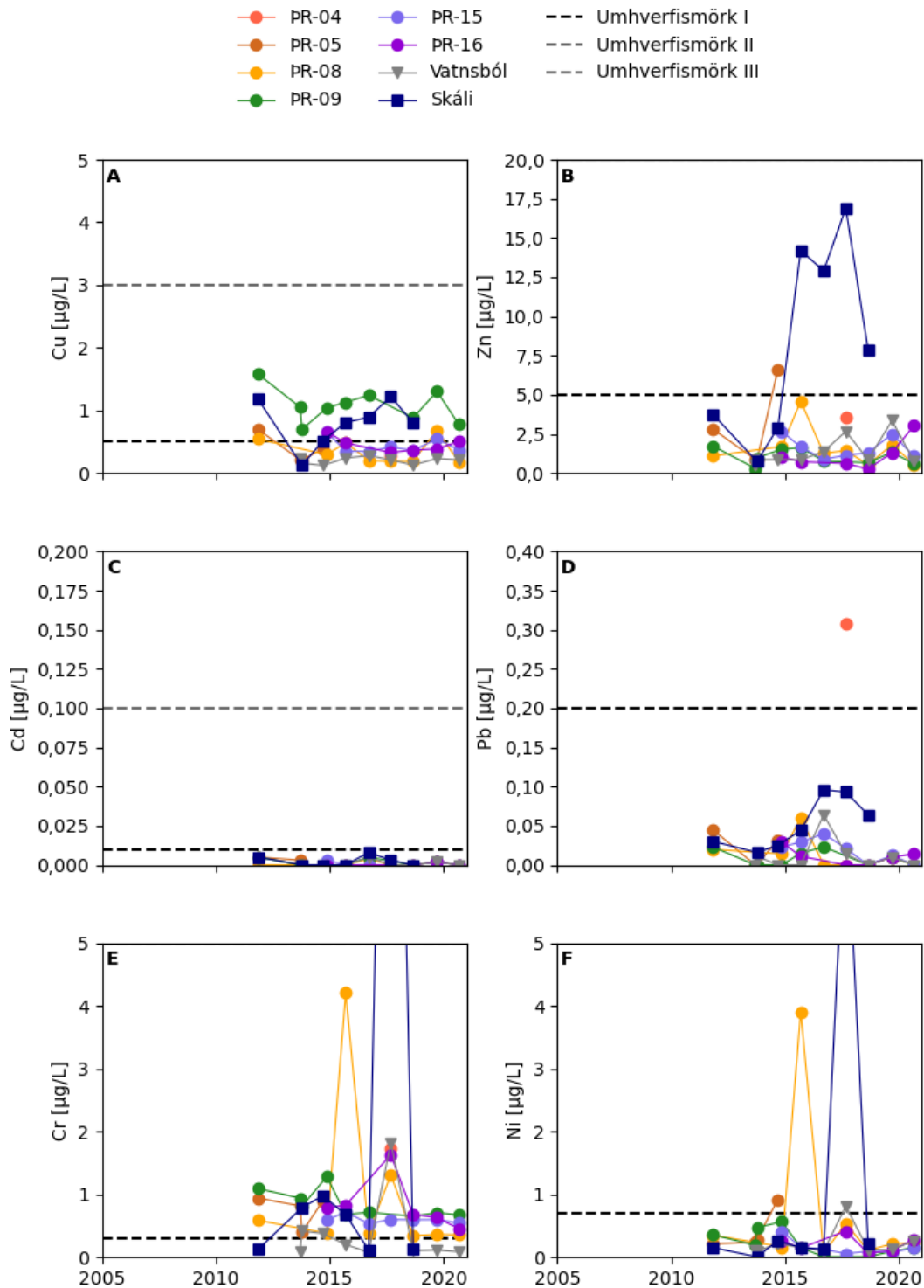
Mynd 55. Styrkur arsens (A) og áls (B) í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I. Viðmiðunarmörk fyrir neysluvatn (200 µg/L) falla utan kvarða myndar (B).



Mynd 56. Styrkur arsens (A) og áls (B) í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I. Viðmiðunarmörk fyrir neysluvatn (200 µg/L) falla utan kvarða myndar (B).



Mynd 57. Styrkur kopars (A), sínks (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr lindum í Kelduhverfi ásamt umhverfismörkum I og II.



Mynd 58. Styrkur kopars (A), sínks (B), kadmíums (C), blýs (D), króms (E) og nikkels (F) í vatni úr holum og lindum á Þeistareykjum ásamt umhverfismörkum I, II og III.

3.4 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

Griótagjá
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“

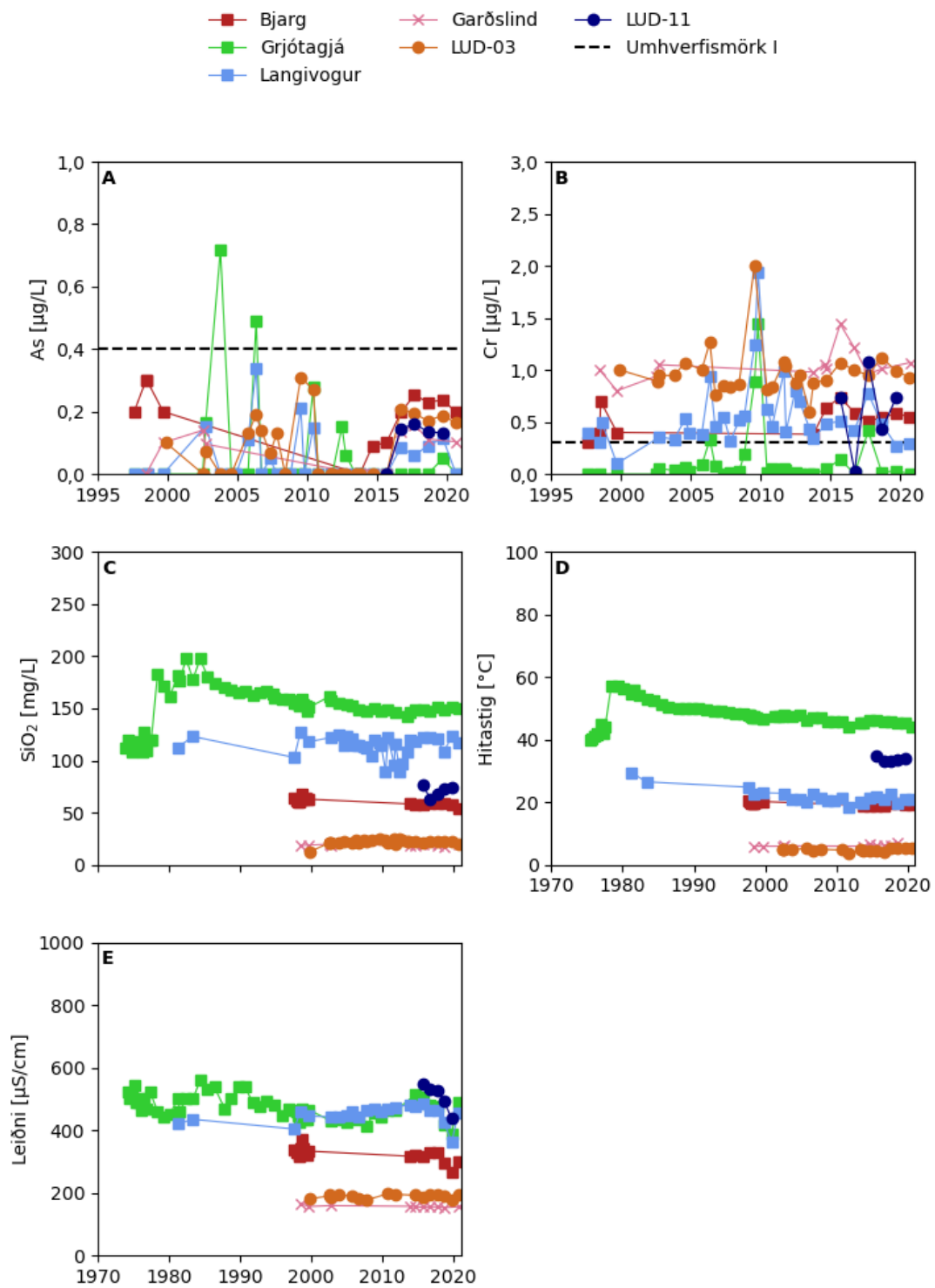
Þeistareykir og Kelduhverfi

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

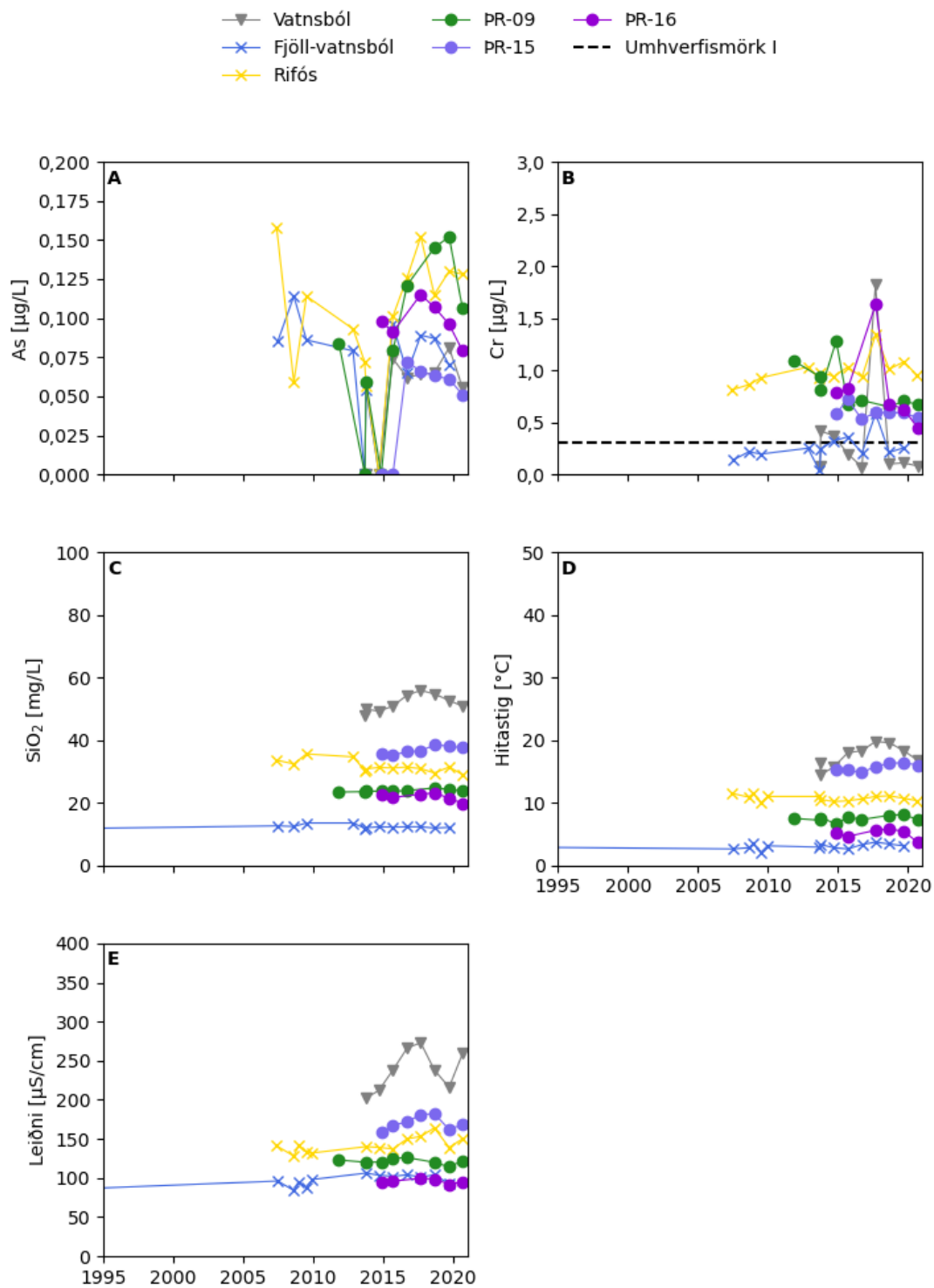
Eftirtalin efni og mæliþættir hafa verið valdir til að sýna niðurstöður fyrir ofangreinda staði:

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

Ekki náðist sýni úr LUD-11 árið 2020 vegna bilunar í djúpdælu og sýnatöku úr vatnsbóli við Fjöll í Kelduhverfi var sleppt að þessu sinni. Niðurstöður mælinga og efnagreininga fyrir þá staði sem voru valdir eru sýndar á myndum 59 og 60. Árið 2019 voru rafleiðnigildi gegnumgangandi lægri en í fyrri mælingum en leiðnigildi fyrir 2020 eru í takti við leiðnimælingar fyrri ára. Ástæðan fyrir þessu fráviki 2019 var að leiðnirafskautið virðist hafa skemmst, sennilega vegna kísilútfellinga.



Mynd 59. Styrkur arsens (A), króms (B), kísils (C), hitastig (D) og rafleiðni (E) á völdum stöðum í Mývatnssveit.



Mynd 60. Styrkur arsens (A), króms (B), kísils (C), hitastig (D) og rafleiðni (E) á völdum stöðum í Kelduhverfi og á Þeistareykjum.

4 Helstu niðurstöður

4.1 Þeistareykir

4.1.1 Yfirborðsvirkni

Dreifing jarðhitans sem kortlagður var á Þeistareykjum sumrin 2012, 2015 og 2018 (Sigurður G. Kristinsson o.fl., 2013a; 2015; 2018) var áþekkt því sem áður hefur verið lýst (Gestur Gíslason o.fl., 1984; Kristján Sæmundsson, 2007). Sumarið 2020 var breytt um aðferðafræði og í stað kortlagningar á jörðu niðri voru teknar ljós- og hitamyndir úr lofti með dróna.

Nokkurt misræmi sést milli þeirrar kortlagningar með ómönnuðu flugfari sem lýst er hér og eldri gagna, og stafar það að mestu af mun á þeirri upplausn sem kortlagt er í. Hér fæst nákvæmari staðsetning á virkum jarðhita en við athuganir á jörðu niðri. Sama er uppi á teningnum í samanburði við eldri loftmyndir en á þeim ekki hægt að greina einstaka jarðhitastaði, aðeins ummynduð svæði. Með myndgreiningu fæst hins vegar tæmandi yfirlit yfir svæðið og má greina milli virks og óvirks jarðhita.

Uppfæra þyrfti jarðhitakort út frá nákvæmari gögnum sem nú eru til svo nota megja þekjurnar til samanburðar milli ára.

Samanburður við eldri loftmyndir og jarðhitakort sýnir nokkra þróun í virkni jarðhitans á Þeistareykjum. Það eru helst tvö svæði þar sem virkni er greinileg á drónamyndum frá 2020, en ekki á eldri gögnum. Annað er við norðurbrún Bæjarfjalls, þar sem virkni teygir úr sér til vesturs og hitt við Ketilfjall þar sem ný virkni kemur fram nálægt borholum ÞG-3, ÞG-6 og ÞG-7.

4.1.2 Gasflæði um jarðveg

Viðamiklar mælingar á jarðvegshitastigi og koldíoxíðflæði um jarðveg voru gerðar á Þeistareykjum sumarið 2020 og var þar um að ræða endurtekningu á mælingum frá árunum 2018, 2015 og 2012. Mælingarnar voru gerðar í 1080 mælipunktum, bæði á mælineti yfir virkasta hluta svæðisins og einnig á mælinum sem áður höfðu verið mældar. Niðurstöðurnar sýna að virknin á Þeistareykjum er mjög skellótt eða blettótt, þ.e. háan hita og mikið koldíoxíð er oftast að finna á mjög afmörkuðum blettum sem aðeins koma fram á stökum mælipunktum en slíka punkta er að finna vítt og breitt um svæðið og er í langflestum tilfellum greinileg jarðhitavirkni á yfirborði. Hitamælingarnar sýndu einnig blettótta virkni og fátítt að heit svæði næðu mikilli stærð. Samanburður á koldíoxíðflæði eldri mælinga og mælinga frá því sumarið 2020 sýndu að aukning hefur orðið í koldíoxíðflæði á norðurhluta Randa og í norðurhlíðum Bæjarfjalls en ekki er um afgerandi aukningu að ræða. Virknin meðfram Bæjarfjalli hefur haldið áfram að teygja sig til norðurs frá því mælt var 2018. Sjáanleg og mælanleg aukning hefur orðið í jarðhitavirkni á yfirborði, þ.e. bæði jarðvegshita og koldíoxíðflæði sunnan við borteig C sem teygir sig í átt að Bóndhólsskarði og varð þessara breytinga fyrst vart sumarið 2018.

4.2 Grunnvatn

4.2.1 Mývatnssveit

Á árinu 2020 fór sýnataka á grunnvatni fram í ágúst, september og október og var alls safnað vatni til efnagreininga á 16 vöktunarstöðum. Að ósk Landsvirkjunar voru sýni ekki tekin úr holum AE-10 og LUD-2, né lindum við Helgavog og Vogafloa. Dælan í holu LUD-11 sló ítrekað út rafstöðinni og því var ekki unnt að safna sýni úr henni.

Það eru nokkrar breytingar á styrk arsens milli ára 2019 og 2020. Styrkur arsens í LUD-4 hefur verið farið lækkaði síðan 2010 og var lægri en 4 µg/L árin 2019 og 2020. Í Bjarnarflagsslóni mældist styrkur arsens 302 µg/L, sem er yfir umhverfismörkum IV og hærri en undanfarin ár. Í vatni frá skiljustöð í Kröflu hefur styrkurinn aukist í 35,8 µg/L, sem þó er ekki miklu hærra en undanfarin ár, en er yfir umhverfismörkum III sem eru 15 µg/L. Í LUD-4 mældist arsenstyrkur innan umhverfismarká II. Styrkur arsens í eftirlitsholum, öðrum en LUD-4, og heitum og köldum lindum í Mývatnssveit fellur í öllum tilvikum nærri eða innan umhverfismarká I ($\leq 0,4$ µg/L). Styrkur arsens mældist innan greiningarmarká í Grjótagjá, Vogagjá og Langavogi. Styrkur áls í Bjarnarflagsslóni og í LUD-4 hefur ekki breyst. Styrkur áls mældist svipaður í vatni frá skiljustöð í Kröflu og í Bjarnarflagsslóni, 1520 µg/L annars vegar og 1330 µg/L hins vegar og vel yfir hámarksgildi fyrir neysluvatn (200 µg/L) en undir hámarksgildi fyrir neysluvatn á öllum öðrum stöðum.

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

4.2.2 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 2020 og voru sýni tekin á fimm stöðum á Þeistareykjum og fjórum stöðum í Kelduhverfi. Að ósk Landsvirkjunar var ekki tekið sýni úr vatnsbóli við Fjöll í Kelduhverfi að þessu sinni, auk þess sem sýnatöku við Þeistareykjaskála var sleppt.

Styrkur arsens er á öllum vöktunarstöðum innan við umhverfismörk I ($\leq 0,4$ µg/L) og styrkur áls er innan við hámarksgildi fyrir neysluvatn (200 µg/L). Líkt og fyrir vöktunarstaði í Mývatnssveit eru sýndar myndir með niðurstöðum efnagreininga fyrir kopar, sínk, kadmíum, blý, króm og nikkell en þessi efni auk arsens eru sérstaklega tilgreind í reglugerð um varnir gegn mengun vatns frá 1999. 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 í skýrslunni eru sýnd umhverfismörk samkvæmt reglugerðinni frá 1999.

5 Heimildaskrá

- Ármannsson, H., Fridriksson, Th., Wiese, F., Hernández, P. og Pérez, N. (2007). CO₂ budget of the Krafla geothermal system NE-Iceland. Í Bullen, P. D. og Wang, Y. (ritstj.) *Water Rock Interaction*, 189–192.
- Ármannsson, H., Kristmannsdóttir, H., Torfason, H. and Ólafsson, M. (2000). Natural changes in unexploited high-temperature geothermal areas in Iceland. *Proc. World Geothermal Congress 2000 Kyushu – Tohoku, Japan, 28. maí til 10. júní*. 521–526.
- Auður Agla Óladóttir (2012). *Application of soil measurements and remote sensing for monitoring changes in geothermal surface activity in the Reykjanes field, Iceland*. Meistaraprófsritgerð við Jarðvísindadeild Háskóla Íslands, 110 s.
- Branson, E. (1993). Environmental Aspects of Aquaculture. Í *Aquaculture for Veterinarians, Fish Husbandry and Medicine*. (Ed. Lydia Brown).
- Cardellini C., Chiodini G. og Frondini F. (2003). Application of stochastic simulations to CO₂ flux from soil: Mapping and quantifying gas release. *J. Geophys. Res.*, 108, 2425.
- Chiodini, G.D., Granieri, R. Avino, S., Caliro, A. C. og Werner, C. (2005). Carbon dioxide diffuse degassing and estimation of heat release from volcanic and hydrothermal systems. *J. Geophys. Res.*, 110, B08204, doi: [10.1029/2004JB003542](https://doi.org/10.1029/2004JB003542)
- Favara, R. Grassa, F., Inguaggiato, S. og Valenza, M. (2001). Hydrogeochemistry and stable isotopes of thermal springs: earthquake-related chemical changes along the Belice Fault (Western Sicily). *Appl. Geochem.* 16, 1–17.
- Finnbogi Óskarsson (2018). *Grunnvatn í Mývatnssveit. Stöðugar samsætur vatns og uppleysta efna*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2018/067, Landsvirkjun, LV-2018-076, 29 bls.
- Finnbogi Óskarsson og Auður Agla Óladóttir (2020). *Leirhnjúkur. Gasstyrkur í gufu og gasflæði um jarðveg*. Íslenskar orkurannsóknir, greinargerð ÍSOR-20041, 14 bls.
- Finnbogi Óskarsson, Magnús Ólafsson og Sigurður G. Kristinsson (2019). *Háhitavæðin á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2019*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2019/077, Landsvirkjun, LV-2019-081, 104 bls.
- Fridriksson, Th., Kristjánsson, B.R., Ármannsson, H., Margrétardóttir, E., Ólafsdóttir, S. og Chiodini, G. (2006). CO₂ emissions and heat flow through soil, and steam heated mud pools at the Reykjanes geothermal area, SW Iceland. *Appl. Geochem.*, 21, 1551–1569
- Gestur Gíslason, Gunnar Johnsen, Halldór Ármannsson, Helgi Torfason og Knútur Árnason (1984). *Þeistareykir – Yfirborðsrannsóknir á háhitavæðinu*. Orkustofnun, OS-84089/JHD-16. 134 s. + 3 kort.
- Granieri, D., Chiodini G., Marzocchi W. og Avino, R. (2003) Continuous monitoring of CO₂ soil diffuse degassing at Phlegraean Fields (Italy): Influence of environmental and volcanic parameters. *Earth and Planetary Science Letters* 212, 167–179.
- Halldór Ármannsson (2001). *Þeistareykir. Yfirlit um rannsóknir og rannsóknarkostnað*. Orkustofnun OS-2001/035, 24 s.
- Halldór Ármannsson (2003). *Förgun affallsvatns frá Kröflu- og Bjarnarflagsvirkjunum*. Orkustofnun, OS-2003/032, 32 bls.

- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2002). Efnarannsóknir á vatni úr holum, lindum og gjám í Búrfellshrauni og nágrenni. Undirstöður vöktunar vegna affalls frá jarðhitavirkjunum, Kröflu og Námafjalli. Orkustofnun, OS-2002/076, 36 s. Unnið fyrir Landsvirkjun.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2004). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2003*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2004/005, Landsvirkjun, LV-2004/052, 14 bls.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2005). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2004*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2005/006, Landsvirkjun, LV-2005/025, 15 bls.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2006a). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2005*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2006/013, Landsvirkjun, LV-2005/064, 15 bls.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2006b). *Collection of geothermal fluids for chemical analysis*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2006/016, 16 bls.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2007). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2006*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2007/003, Landsvirkjun, LV-2007/007, 14 bls.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2012). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2011*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2012/006; Landsvirkjun, LV-2012/021, 17 bls.
- Halldór Ármannsson, Magnús Ólafsson og Ester Eyjólfsdóttir (2010). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2009*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2010/018, Landsvirkjun, LV-2010/055, 16 bls.
- Halldór Ármannsson, Magnús Ólafsson og Hörður Tryggvason (2011). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2010*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2011/007, Landsvirkjun, LV-2011/027, 15 bls.
- Halldór Ármannsson, Magnús Ólafsson og Mozhgan Bagheri (2008). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2007*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2009/011, Landsvirkjun, LV-2008/064, 12 bls.
- Halldór Ármannsson, Magnús Ólafsson, Mozhgan Bagheri og Auður Ingimarsdóttir (2009). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2008*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2008/018, Landsvirkjun, LV-2009/020, 15 bls.
- Hrefna Kristmannsdóttir (2010). *Grunnvatnsrannsóknir í Norðurþingi 2007–2009*. Landsvirkjun, LV-2011/074, 50 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.
- Magnús Ólafsson, Gunnar Þorgilsson og Finnþogi Óskarsson (2020). *Ferilpróf frá holu LUD-12 í Mývatnssveit. Könnun á afdrifum affallsvatns frá Jarðböðunum*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2020/017, 39 bls.

- Maryam Khodayar, Sveinbjörn Björnsson, Ragna Karlsdóttir, Kristján Ágústsson og Magnús Ólafsson (2015). *Tectonic control of alteration, gases, resistivity, magnetics 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.
- Óladóttir, A.A. og Fridriksson, Th. (2015). The Evolution of CO₂ Emissions and heat flow, through soil since 2004 in the utilized Reykjanes geothermal area, SW Iceland: ten years of observations on changes in geothermal surface activity. *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19–25 apríl 2015*. 10 s.
- 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 2016*. 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 2018*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2018/069, Landsvirkjun, LV-2018-090, 168 bls.
- Sigurður G. Kristinsson, Finnbogi Óskarsson, Auður Agla Óladóttir og Magnús Ólafsson (2019). *Háhitavæðin á Þeistareykjum í Kröflu og Námafjalli. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni árið 2019*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2019/077, Landsvirkjun, LV-2019-081, 104 bls.
- 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 Nielsson (2013b). *Háhitavæðin á Þeistareykjum, í Kröflu og Námafjalli. Vöktun á yfirborðsvirkni og grunnvatni*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2013/037, Landsvirkjun, LV-2013-091, 152 bls.

Þráinn Friðriksson, Kristján Sæmundsson, Auður Agla Óladóttir, Gunnlaugur M. Einarsson, Sigurður G. Kristinsson, Halldór Ármannsson og Ester Eyjólfsdóttir (2010). *Umhverfiseftirlit á jarðhitasvæðinu á Reykjanesi*. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR 2010/100.

Umhverfisstofnun (2014). *Breytingartillaga að vöktun grunnvatns á Mývatnssvæði*. Bréf dags. 12. júní 2014. Tilvísun: UST20140500178/döhp

Viðauki 1: Sýnameðhöndlun og efnagreiningaraðferðir

Vatnssýni

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

Karbónat (CO₂): Sýnum er safnað á loftþéttar glerflöskur og þau greind með 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 H₂S, H₂O og fleiri daufra sýra.

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

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

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

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

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

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

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

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

Samsætur (δD og δ¹⁸O): Síuðum sýnum er safnað á loftþéttar glerflöskur og hlutfall þungra og léttra samsætna ákvarðað á massagreini hjá Isotech Laboratories í Bandaríkjunum. Samsætuhlutföll eru gefin upp sem ‰-vik frá sömu hlutföllum í staðalsjó (V-SMOW).