

Vegagerðin

Vöktun Jarðhitasvæða

við Hveradali með hitamyndavél á dróna



Um skýrsluna

Titill:

Vöktun Jarðhitasvæða við Hveradali með hitamyndavél á dróna

Útgáfa: 1.0

Dagsetning útgáfu: 10.03.2025

Höfundar:

Ingbór Ingason, Verkefnastjóri Landupplýsinga og Dróna, ReSource International ehf.

Gæðastjórar:

Nicolas Marino Proietti, Umhverfisverkfræðingur, ReSource International ehf.

Ráðgjafarfyrtæki:

ReSource International ehf.

Árleynir 8,

112 Reykjavík, Ísland

+354 571 5864

Viðskiptavinur:

Vegagerðin

Tengiliður:

Kristinn Lind Guðmundsson

kristinn.l.gudmundsson@vegagerdin.is



Efnisyfirlit

1	Inngangur.....	1
2	Undirbúningur og flug.....	1
3	Úrvinnsla.....	4
4	Niðurstöður	12

Höfundar skýrslunnar bera ábyrgð á innihaldi hennar. Niðurstöður hennar ber ekki að túlka sem yfirlýsta stefnu Vegagerðarinnar eða álit þeirra stofnana eða fyrirtækja sem höfundar starfa hjá.

1 Inngangur

Þetta tilraunaverkefni miðaði að því að meta getu dróna til að vakta jarðhitabreytingar á hverasvæði. Verkefnið var unnið í samstarfi við Vegagerðina og beindist að fyrirfram skilgreindum vegarkafli í Hveradölum á Hellisheiði þar sem aukin jarðvirkni hefur komið fram undanfarin misseri. Vegfarendur hafa greint frá gufu sem stígur upp meðfram veginum sem kallaði á nánari rannsókn. Farið var í þrjár vettvangsferðir á svæðið þar sem dróna með hitamyndavél (DJI Matrice 3t) var flogið yfir svæðið. Þennan dróna má sjá á mynd 2b. Í þessu skjali verður fjallað um framkvæmd drónaflugsins, úrvinnslu gagnanna og að lokum verða niðurstöður kynntar.

2 Undirbúningur og flug

Byrjað var á að skilgreina þá leið sem dróninn skyldi fljúga yfir svæðið. Ákveðið var að láta hann fljúga í 30m hæð og láta allar myndir skara mikið (um 70%) svo hægt sé að smíða líkan úr gögnunum og fá flott kort. Á mynd 1 má sjá þann feril sem dróninn var látinn fljúga og var þetta um 1722 venjulegar myndir (rgb) ásamt jafn mörgum hitamyndum þar sem þær eru teknar samhliða þeim venjulegu.



Mynd 1 - Flugleið dróna

Tafla 1 - Flugaðstæður

Flug	Dagsetning	Birtustig	Vindur [m/s]	Hiti [°C]	Rakastig [%]
A	2024-09-13	Sólskin	13	7.7	40
B	2024-11-13	Skýjað	12	4.4	89
C	2025-01-20	Skýjað	9	-2.2	79

Með flugleiðina skilgreinda var ekkert að vanbúnaði og lagt var af stað með drónann. Í heildina var flogið yfir svæðið 3 sinnum og var sama leið endurtekin í hvert skipti til að auðvelda samanburð á gögnum. Í töflu 1 hér fyrir ofan má sjá upplýsingar um hvert flug fyrir sig.



(a) Hitamælir



(b) DJI Matrice 3t dróninn

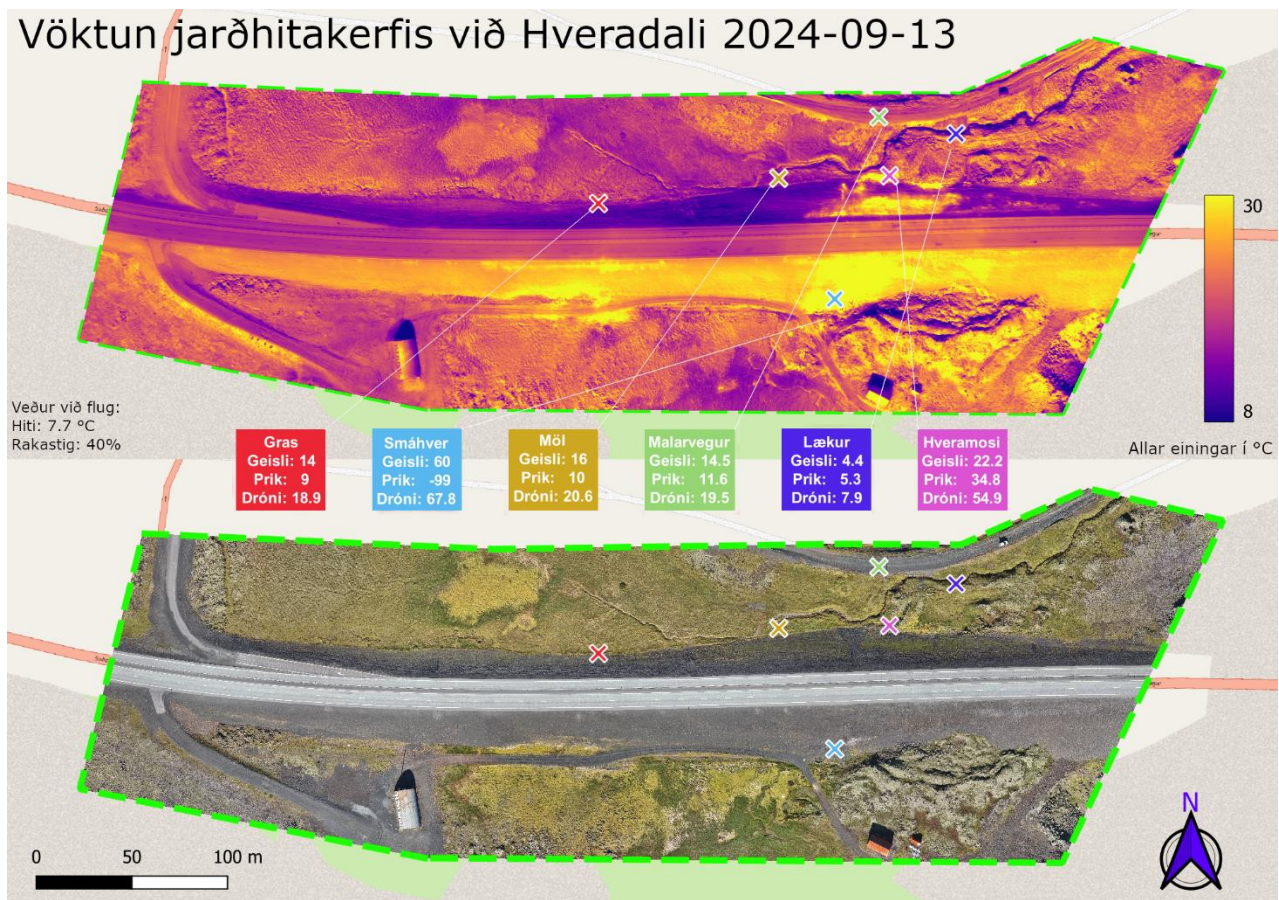
Mynd 2 - Tæki í yfirborðshitamælingar

Til að staðfesta að þær hitamælingar sem koma úr drónanum væru áreiðanlegar var ákveðið að bera þær saman við tölur fengnar með öðrum hætti. Í það var einfaldur hitamælir notaður og má sjá hann á mynd 2a. Líkt og dróninn þá mælir þetta tæki hita með innrauðu ljósi án snertingar. Þessi aðferð hefur sínar takmarkanir en hægt er að draga þá ályktun að tæki þetta skili áreiðanlegri tölum heldur en dróninn. Bæði er mælt alveg upp við hlutinn og í stað þess að taka heila mynd er einungis einn geisli sendur úr tækinu. Þar af leiðandi, með því að bera saman tölur úr drónanum má fá hugmynd um hve vel tókst að hita-mynda yfirborðið.

Þessi samanburður var einungis framkvæmdur í fyrsta fluginu (flug A) og má sjá niðurstöðurnar í töflu 2. Hitamælirinn á mynd 3 býður upp á 2 aðferðir við mælingar. Mæling með geisla (án snertingar) og mæling með priki (snerting) og voru báðar aðferðir nýttar.

Tafla 2 - Samanburður dróna og hitamælis (allar tölur í °C)

Undirlag	Dróni	Geisli	Prik
Gras	18.9	14	9
Hver	67.8	60	-
Möl	20.6	16	10
Malarvegur	19.5	14.5	11.6
Lækur	7.9	4.4	5.3
Heitur Mosi	54.9	22.2	34.9

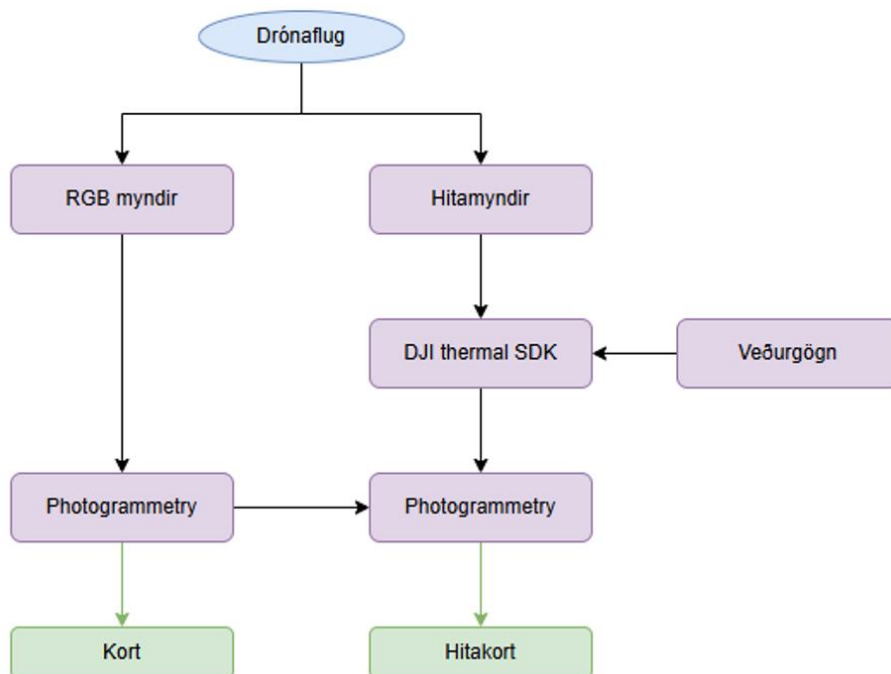


Mynd 3 - Samanburður dróna og hitamælis (allar tölur í °C). Neðra kortið

Eins og sjá má á töflu 2 getur verið talsverður munur á mælingum úr dróna og hitamæli. Hins vegar, þegar geisla-mælingar hitamælisins eru bornar saman við drónann, sést að munurinn er einungis nokkrar gráður. Hitamælirinn sýnir yfirleitt 4–7 gráðum lægri gildi en dróninn. Slíkar skekkjur má rekja til ýmissa þátta sem hafa áhrif á mælingarnar. Þrátt fyrir það gefur dróninn tiltölulega áreiðanlegar niðurstöður, þó þær séu ekki fullkomlega nákvæmar. Gera má ráð fyrir að mælingar innan drónans séu nokkuð samræmdar, þrátt fyrir að heildarlíkanið innihaldi ákveðna kerfisskekkju sem hægt væri að hliðra niður svo það passi við geisla-mælingarnar. Mikill munur er á heita mosanum aftur á móti en líklega má rekja það til ónákvæmra staðsetningamælinga samhliða geisla-mælingum og hægt að hunsa. Prik-mælingar sýna mikinn mun miðað við hinar 2 aðferðirnar en það var svosem við búið þar sem það er ekki að mæla yfirborðshita heldur nokkra cm undir yfirborðið og því ekki jafn viðeigandi í þessu verkefni. Mynd 3 sýnir staðsetningu mælinganna í töflu 2 á hitakorti og réttmynd.

3 Úrvinnsla

Þó nokkur skref voru fólgin í úrvinnslu gagnanna en til einföldunar verður stiklað á stóru. Meginskrefin eru birt á mynd 4 og þar má sjá að loka afurðin er annars vegar venjulegt kort og hins vegar hitakort af svæðinu. Rétt er líka að benda á að úrvinnslan var sú sama fyrir öll flugin og því dugar að gefa henni skil einungis einu sinni.

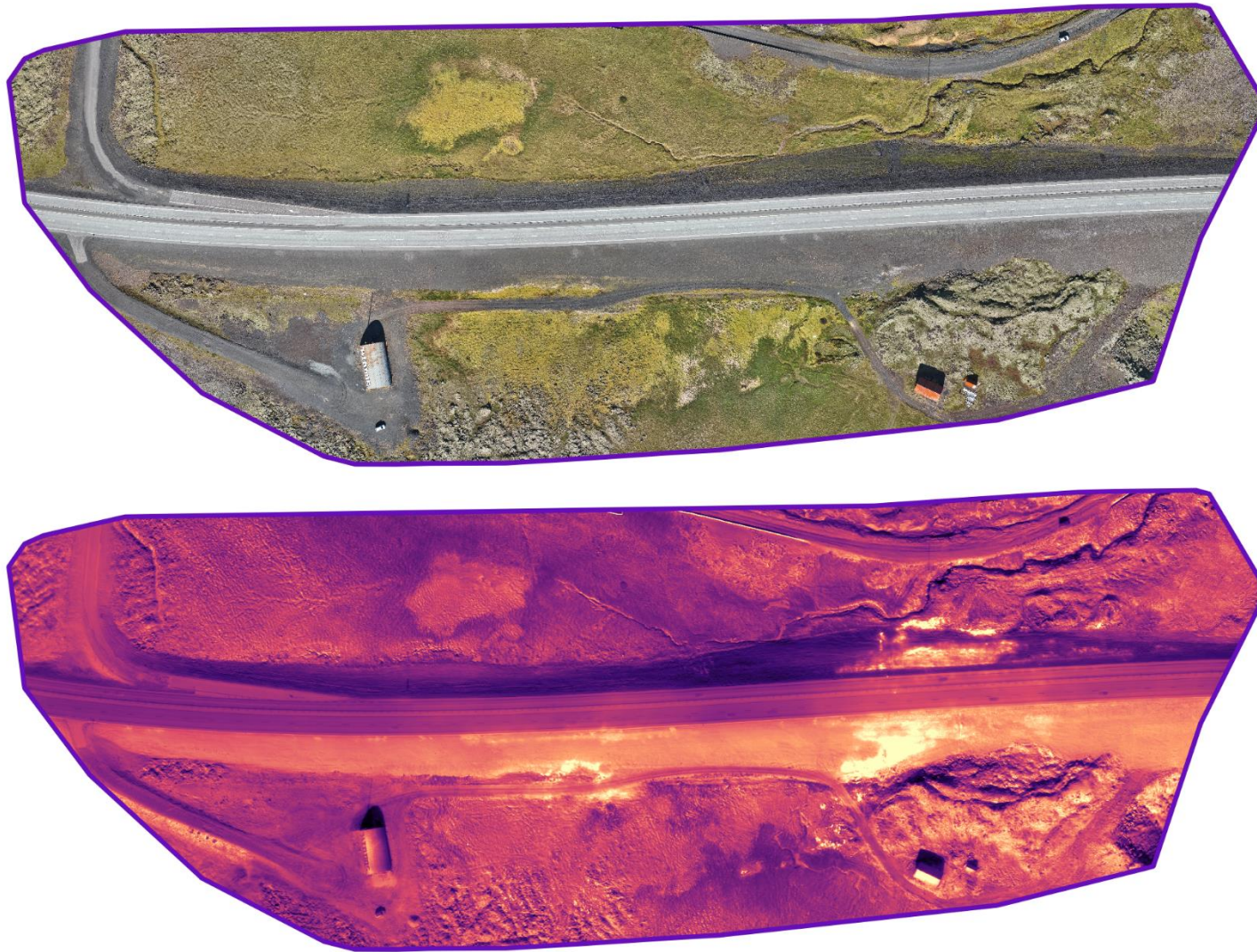


Mynd 4 - Yfirlit yfir aðalsref í úrvinnslu

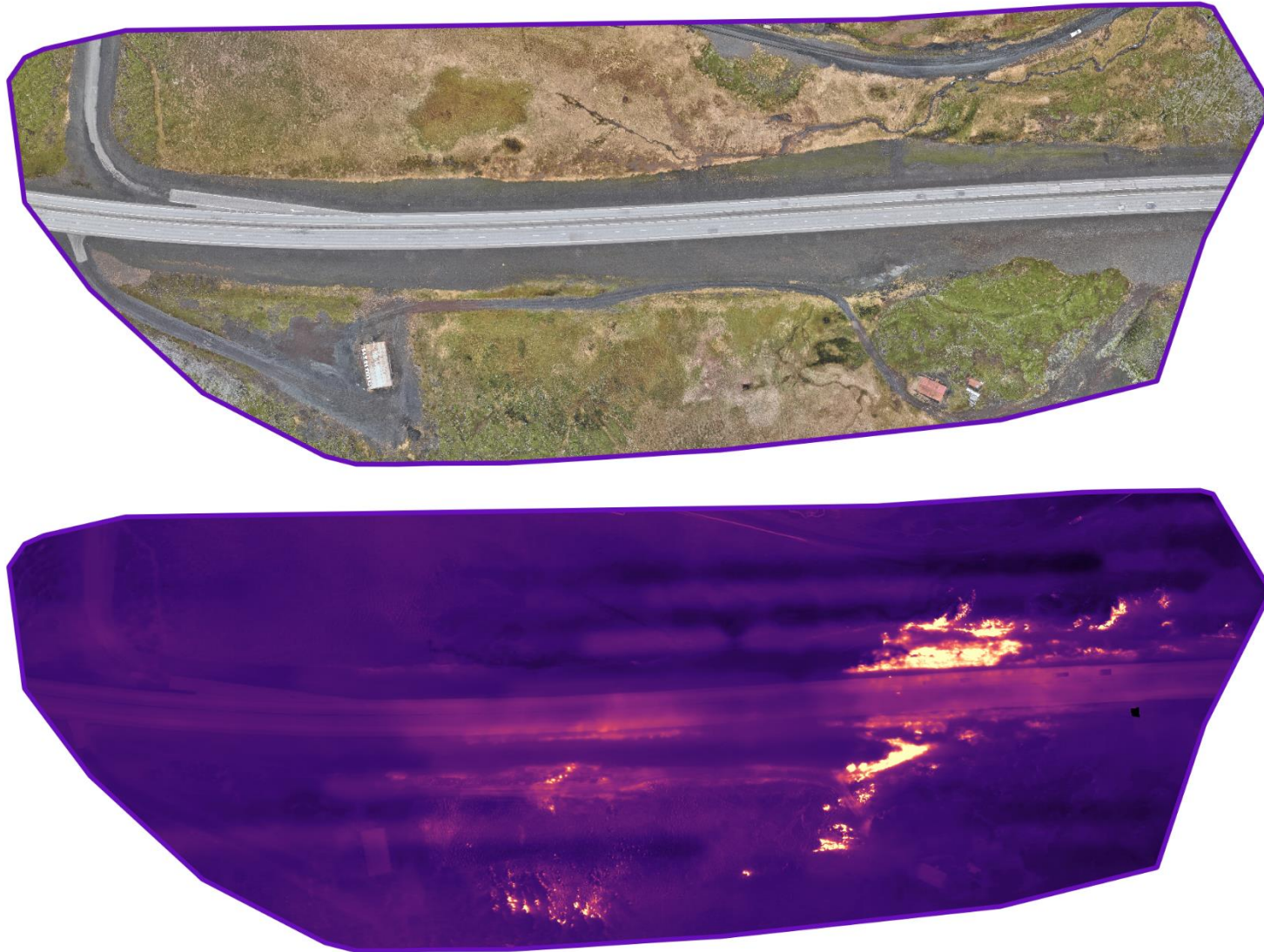
Eins og sjá má á mynd 4 er það einfaldara mál að fá út kort. Það er einungis eitt skref innifalið í því, (e. photogrammetry). Það eru fræði sem snúast um að setja saman margar myndir og smíða líkan á borð við kort (réttmynd). Innifalið í þessu eru fjölmörg atriðið og reikningar en hægt er að skipta því niður í 3 skref til einföldunar:

- **Tengipunktur útbúnir:** Byrjað er á að taka hverja loftmynd fyrir sig og hugbúnaður notaður til að finna svokallaða lykilpunkta. Þetta eru punktar sem eru einkennandi á svæðinu og skera sig frá bakgrunninum. Svo fer annað ferli í gang sem reynir að sameina lykilpunkta milli mynda og ef það heppnast verðar þeir punktar að tengipunktum. Þeir, samhliða grófum GPS staðsetningum á loftmyndunum duga til að setja saman gegnheilt líkan af öllu svæðinu.
- **Þétting punkta:** Fyrsta skrefið skilar grisjóttu líkani og því þarf að þétta það með fleiri reikningum. Í það eru sérhæfðir (e. interpolation) reiknirit notuð og niðurstaðan er punktský af svæðinu sem lítur töluvert betur út heldur en tengipunktarnir einir á báti.
- **Kort búið til:** Loka skrefið er að koma líkaninu úr vektor-formi yfir á myndaform (e. raster) sem er töluvert auðveldara að vinna með og skoða. Þar kemur til annað samansafn reiknirita sem færa gögnin yfir. Lokaniðurstaðan er flott kort af svæðinu ásamt hæðarkorti ef þess er óskað.

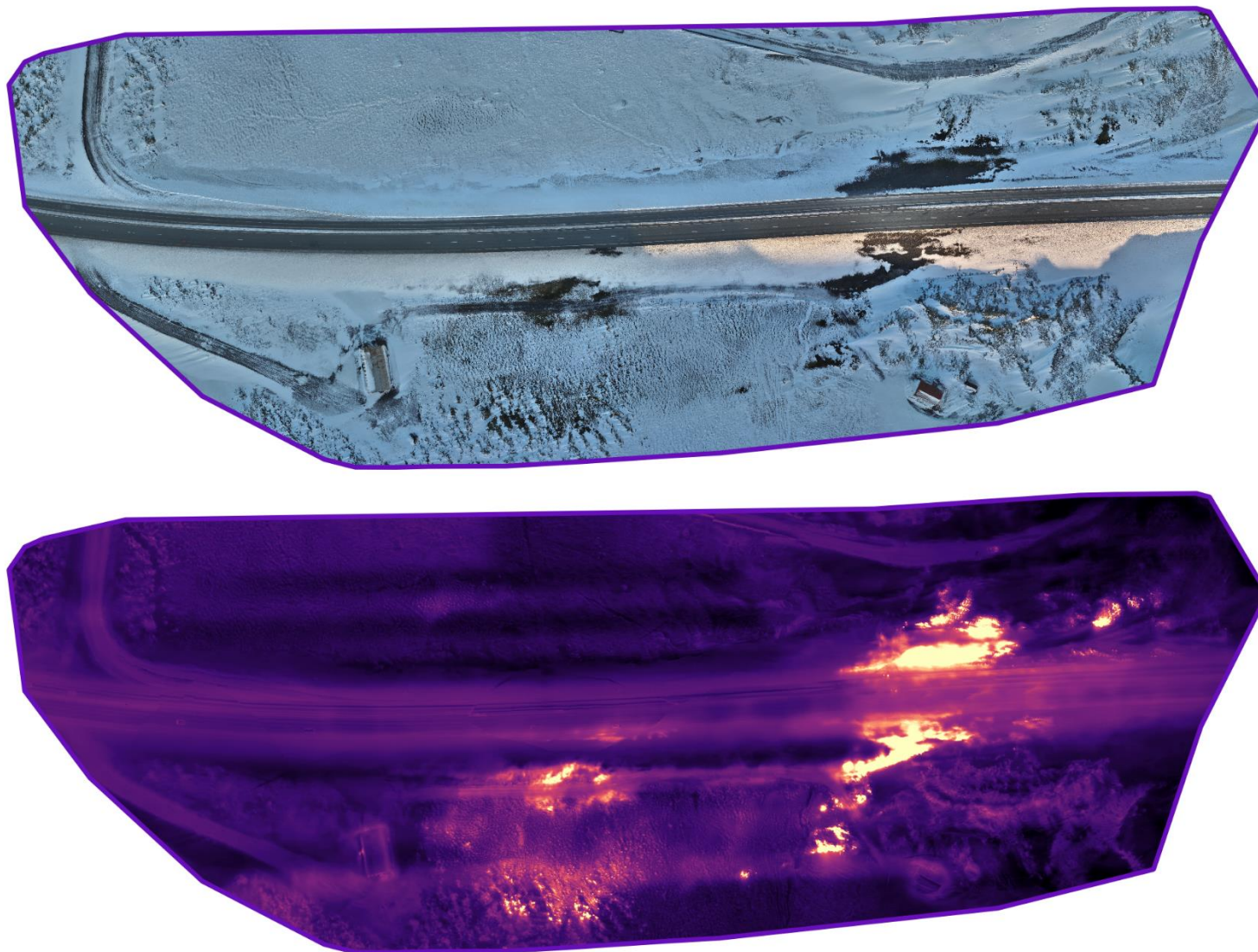
Hægt væri að beita photogrammetry beint á hitamyndirnar, eins og gert var fyrir RGB, en niðurstaðan yrði ekki góð og því þarf að taka önnur skref. Fyrst og fremst eru hitamyndirnar úr drónum ekki geislaþræðingalega leiðréttar (e. radiometrically corrected), sem þýðir að þær innihalda ekki nákvæm hitagildi. Í stað þess að sýna raunverulegt hitastig í gráðum, sýna þær eingöngu hlutfallslegar hitabreytingar innan myndarinnar. Hins vegar skráir dróninn nauðsynlegar upplýsingar (e. metadata) í allar hitamyndir sem gerir það mögulegt að framkvæma leiðréttingu og reikna út hitastig í gráðum. DJI hefur þróað forrit, DJI Thermal SDK, sem sér um þessa leiðréttingu og með smá forritun og með því að bæta inn veðurupplýsingum (rakastig og hitastig) við flug ásamt flughæð drónans er hægt að umbreyta gögnunum og fá nálgðu hitagildi í gráðum. Þegar hitastigsgildin hafa verið leiðrétt er hægt að beita photogrammetry. Hins vegar eru hitamyndirnar í mun lægri upplausn en RGB-myndirnar og innihalda aðeins eitt (e. band), á meðan RGB-myndir hafa þrjú. Þetta gerir það mun erfiðara að búa til líkan eingöngu út frá hitamyndunum. Það vill samt svo til að dróninn tekur RGB-myndir og hitamyndir samtímis, sem þýðir að hægt er að nota reiknaðar staðsetningar úr RGB-myndunum til að auðvelda úrvinnslu hitamyndanna. Þetta einfaldar ferlið og eykur nákvæmni við gerð líkansins út frá hitagögnum. Þegar búið er að vinna úr öllum upplýsingum fyrir öll 3 flugin eru komin gögn sem hægt er að vinna með frekar og bera saman. Hér fyrir neðan á myndum 5 til 7 má sjá bæði kort og hitakort úr öllum flugunum.



Mynd 5 - rgb (efra kort) og hitamynd (neðra kort) af flugi: A



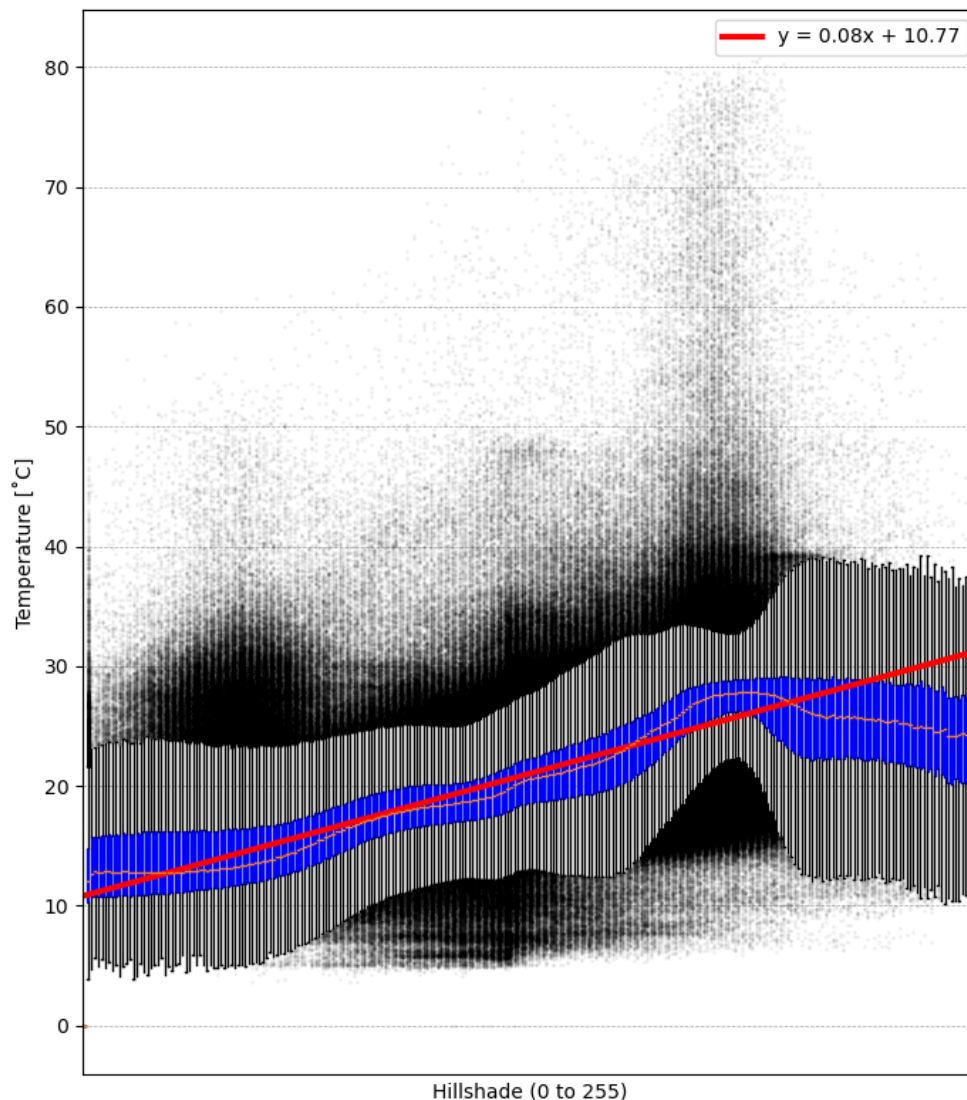
Mynd 6 - rgb (efra kort) og hitamynd (neðra kort) af flugi: B



Mynd 7 - rgb (efra kort) og hitamynd (neðra kort) af flugi: C

Eins og sjá má er töluverður munur á þessum þremur hitakortum. Hitakortið úr flugi A virðist við fyrstu sýn skila bestum niðurstöðum, en þar er einnig mestur breytileiki í hitastigum. Hin tvö hitakortin eru einsleitari, þar sem hitastigið virðist nokkurn veginn jafnt yfir allt svæðið fyrir utan jarðhitasvæðin. Helsta ástæða þessa munar er sólarljósið. Flug A var flogið í heiðskýru veðri með sólina lágt á lofti sem þýðir að sólinn hitaði yfirborð ójafnt upp. Það svæði sem snýr að sólinni er heitara heldur en það sem er í skugga og þessi munur þýðir meiri breytileika yfir hitakortið allt. Áhrif sólarinnar eru mest áberandi á vegöxlunum ef litið er aftur á hitakort á mynd 5. Það vill svo til að einmitt út af þessum breytileika þá gekk best að smíða hitakort fyrir það flug með photogrammetry því það byggir á að finna punkta milli mynda sem er töluvert efiðara ef svæðið er einhæft. Aftur á móti þýðir það líka að erfiðara sé að bera hitakortið saman við hin 2. En þar sem markmiðið í þessu verkefni er einmitt að bera saman hitakort til að rannsaka jarðhitabreytingar yfir tíma þá er mikilvægt að samræma gögnin eins vel og hægt er en það felur í sér að lágmarka áhrif annarra þátta á hitamælingar. Ákjósanlegt væri að fjarlægja áhrif sólar á hitamælingar en það er hægara sagt en gert.

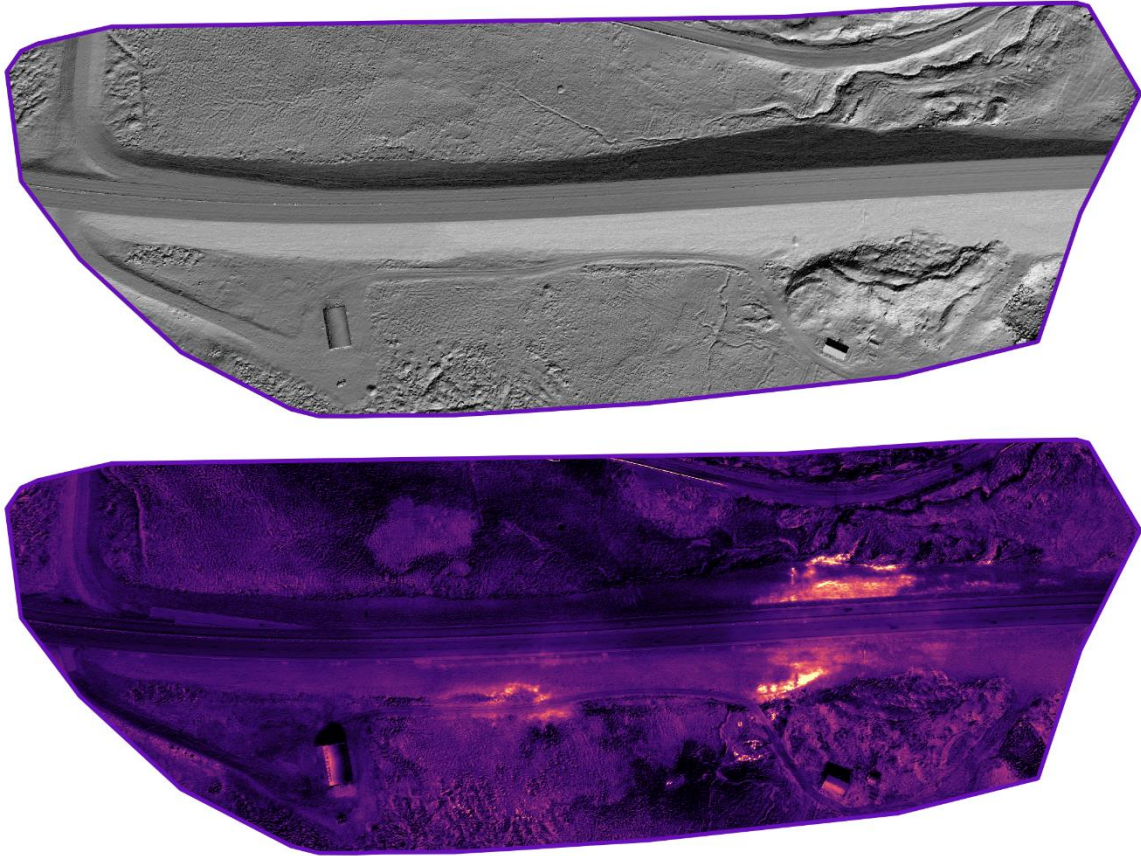
Sú aðferð sem beitt var í þessu verkefni til að takmarka áhrif sólar var að reikna fylgni milli (e. hillshade) og hitastigs, nálga það með fyrsta stigs margliðu og nota hallatöluna til þess að reikna ný hitagildi. Hillshade er vel til þess fallið en það reiknast út frá hæðarlíkani af svæðinu og staðsetningu sólar og gefur svo gildi milli 70 til 255 eftir því hversu beint (e. pixel) snýr að sólinni. 0 þýðir að pixel snýr frá sólu og 255 táknar að pixel snúi beint að sólu. Á mynd 8 er þessi fylgni sýnd. Þar er hver einasti pixel í hitakortinu flokkaður niður eftir hillshade tölu og (e. box plot) búið til fyrir hvern flokk. Appelsínugula línan er reiknað meðaltal í hverjum flokki á meðan rauða línan er nálgaða margliðan. Sjá má á myndinni að augljós fylgni er til staðar og lokaskref er svo að nota margliðuna til að reikna út ný hitagildi. Það er einfaldlega gert með því margfalda hillshade tölunni við hallatöluna og draga það frá upprunalegri hitatölu. Þetta jafnar út hitastig yfir svæðið og lætur hitakort A líta meira út eins og hitakort B og C. Hillshade kortið má sjá á mynd 9 og leiðrétt hitakort má sjá þar líka.



Mynd 8 - Hitastig sem fall af hillshade. (e. Box plot) er reiknað fyrir allar

Að leiðrétta fyrir mismunandi umhverfishita er annað mikilvægt skref til að geta borið hitakortin saman á þýðingarmikinn máta. Ein nálgun væri einfaldlega að áætla eitthvert bakgrunnsgildi sem væri svo notað sem ákveðinn núllpunktur. Hve langt yfir þessari tölu tiltekið svæði er getur sagt mikið um hve mikill jarðhiti er til staðar. Hægt væri einfaldlega að nota lofthitann sem núll punkt eða nákvæmari leið væri að nota meðalhita á svæði sem sýnir engin merki um jarðhita og það verður gert í þessu verkefni. Valið var smá svæði á vesturhelmingi (vinstri hlið) svæðisins en þar er ekki að finna neinn aukinn yfirborðshita. Reiknað var meðaltal á þessu svæði fyrir flugin þrjú og má sjá niðurstöðurnar í töflu 3. Þessar tölur eru svipaðar og mældur lofthiti eins og við mátti búast og verða þessar tölur nýttar sem 0-gildi til að geta betur borið kortin saman. Formúlan hér að neðan verður notuð til að reikna delta hitastig.

$$\Delta T = T - \theta_{gidli} \quad (1)$$



Mynd 9 - hillshade (efra kort) og leiðrétt hitamynd (neðra kort) af flugi: A

Tafla 3 - Útreiknaður meðal-yfirborðshiti á hlutlausu svæði (enginn jarðhiti) sem

Flug A:	10.6
Flug B:	8.3
Flug C:	-2.4

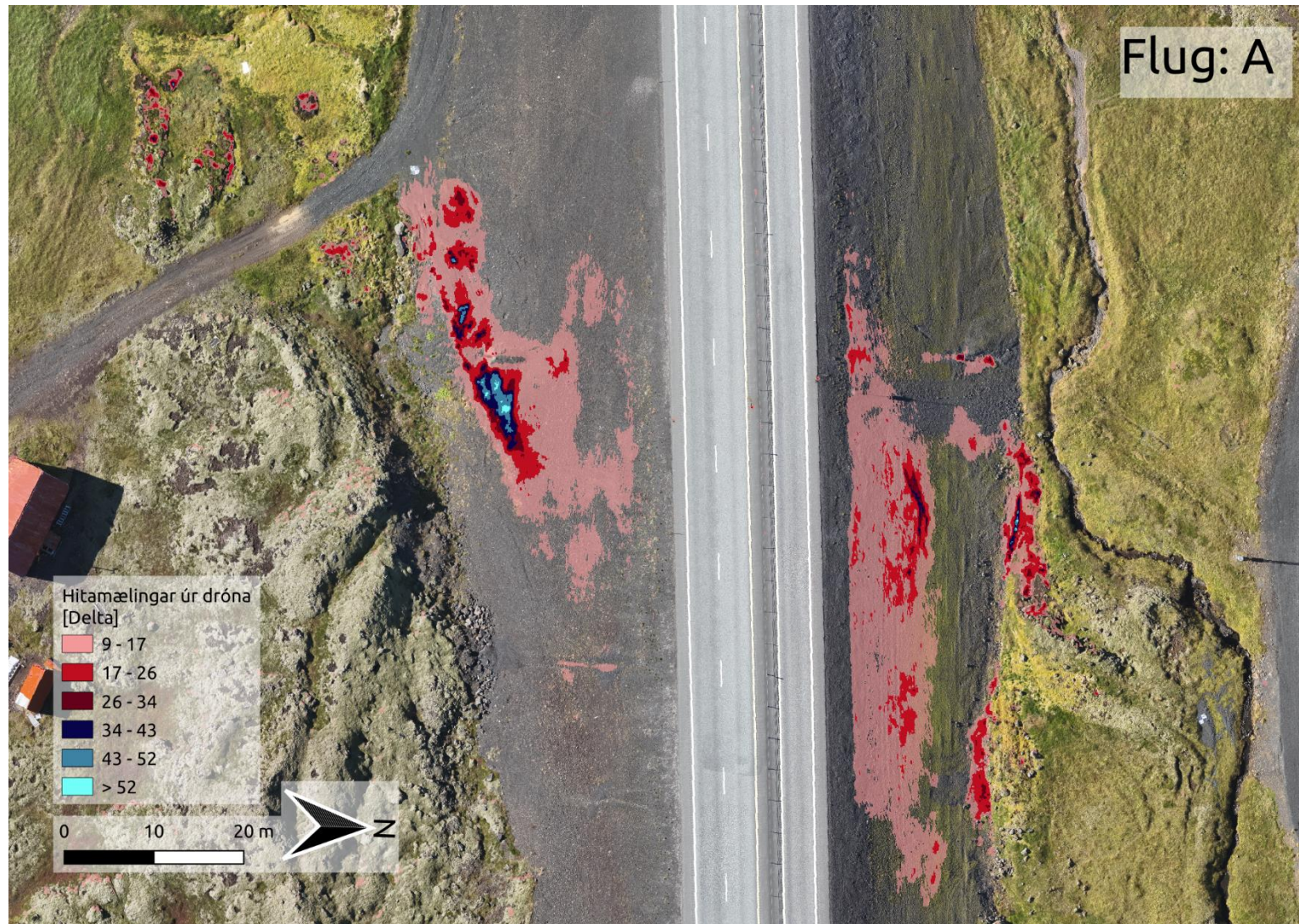
Rétt er að benda á að þessi aðferð er hinsvegar frumstæð. Hún gerir ráð fyrir að það sé línulegt samband milli yfirborðshita og lofthita sem er ekki raunin. T.d. ef hver mælist 60°C á degi þar sem lofhitinn var 15 gráður, þá er ekki hægt að álykta að hverinn mælist 40°C á köldum -5°C degi. Sambandið er flóknara en það og margir þættir hafa áhrif og gera samanburð flóknari. Vindhraði, varmaflæði, rakastig og efnasamsetning á jarðveginum hafa áhrif svo eitthvað sé nefnt. En þar sem upplýsingar um slíkar breytur eru ekki til staðar verður það látið vera og reiknað verður út delta hitastig fyrir kortin 3.

4 Niðurstöður

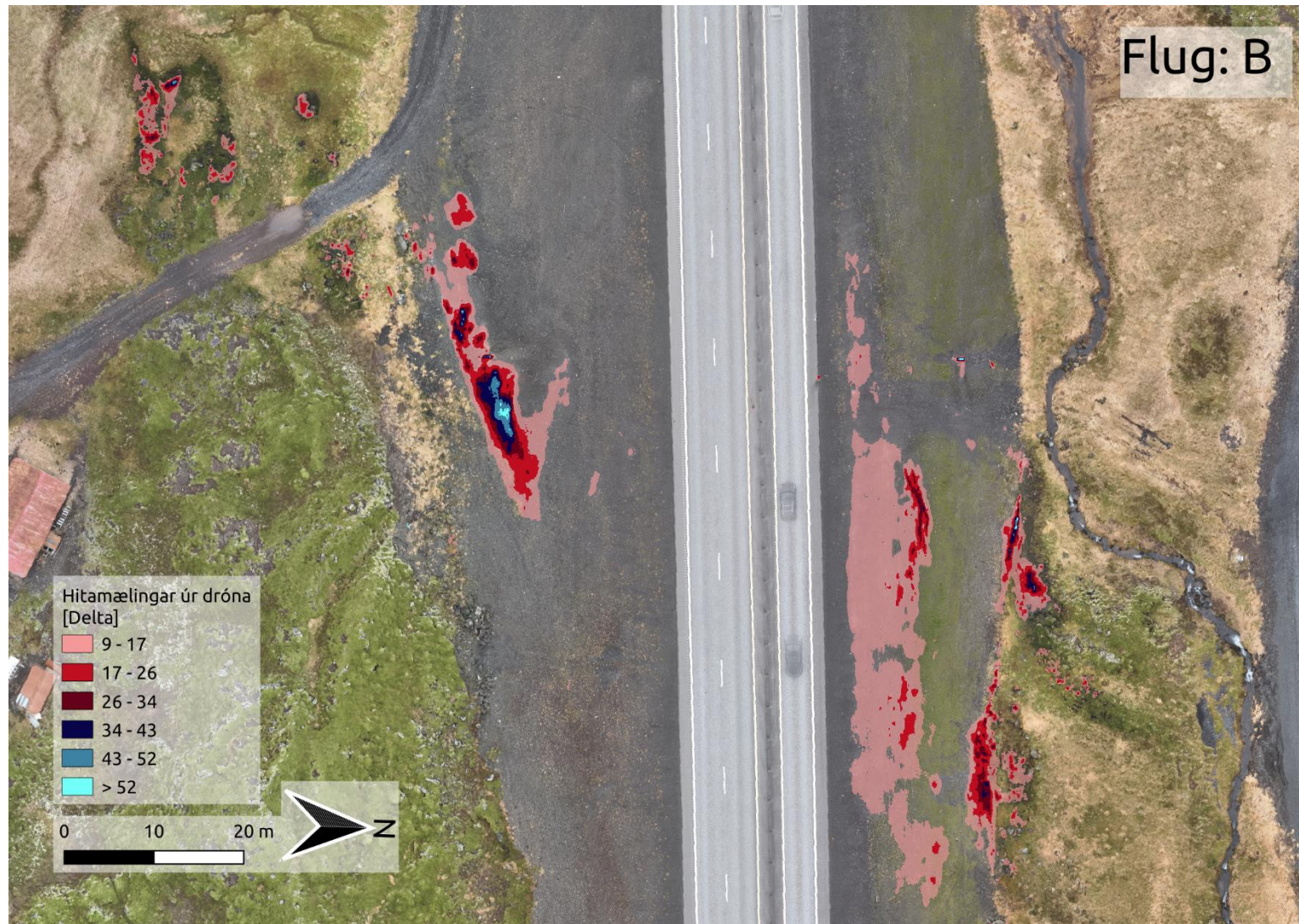
Öll hitakortin í þessu verkefni eiga það sameiginlegt að sýna langmestan jarðvarma á afmörkuðu vegkafla á austuhlið svæðisins nálægt skátahúsinu. Reyndar má sjá annan vegkafla aðeins til vesturs sem líka virðist búa yfir einhverjum jarðhita en það er þó töluverð minni virkni en á hinu svæðinu og þar af leiðandi verður alfarið einblínt á það í þessum kafla. Eins og talað var um í kafla 3 var mikið lagt upp úr því að samhæfa hitakortin 3 svo hægt væri að bera þau saman á sem skilvirkasta máta. Hitakort úr flugi A var leiðrétt fyrir sólarljós og til að tækla mismunandi umhverfishita við mælingar var ákveðið að reikna delta hitastig í stað þess að sýna hitatölurnar sjálfar. Delta hitastig fyrir virkasta jarðhitasvæðið er birt á myndum 10 til 12.

Litirnir á kortunum eru flokkaðir þannig að yfirborðshiti undir 9 gráðum frá viðmiðunargildinu (0-gildi) er ekki sýndur. Litirnir verða skarpari eftir því sem hitinn eykst, þar sem blár litur táknar mesta hitamun (yfir 52 gráður). Á öllum kortunum kemur fram aðeins einn blár blettur, alltaf á sama stað (syðri vegöxlinni). Þar er öflugasti jarðhitinn og við fyrstu sýn mætti álykta að virkni sé að aukast þegar kortin þrjú eru borin saman. Kortið á mynd 7 sýnir greinilega mestu virknina en mynd 6 þá minnstu. Aftur á móti er mikilvægt að hafa í huga að ekki er hægt að fullyrða neitt um það að svo stöddu. Í fyrsta lagi var lofthitinn við flug C lang lægstur sem hefur áhrif á ΔT og hjálpar að útskýra muninn. Hægt er líka að benda á aðra þætti eins og ónákvæmni í mælitæki og náttúrulegar sveiflur í jarðhita til að útskýra þann mun sem sjá má milli kortanna.

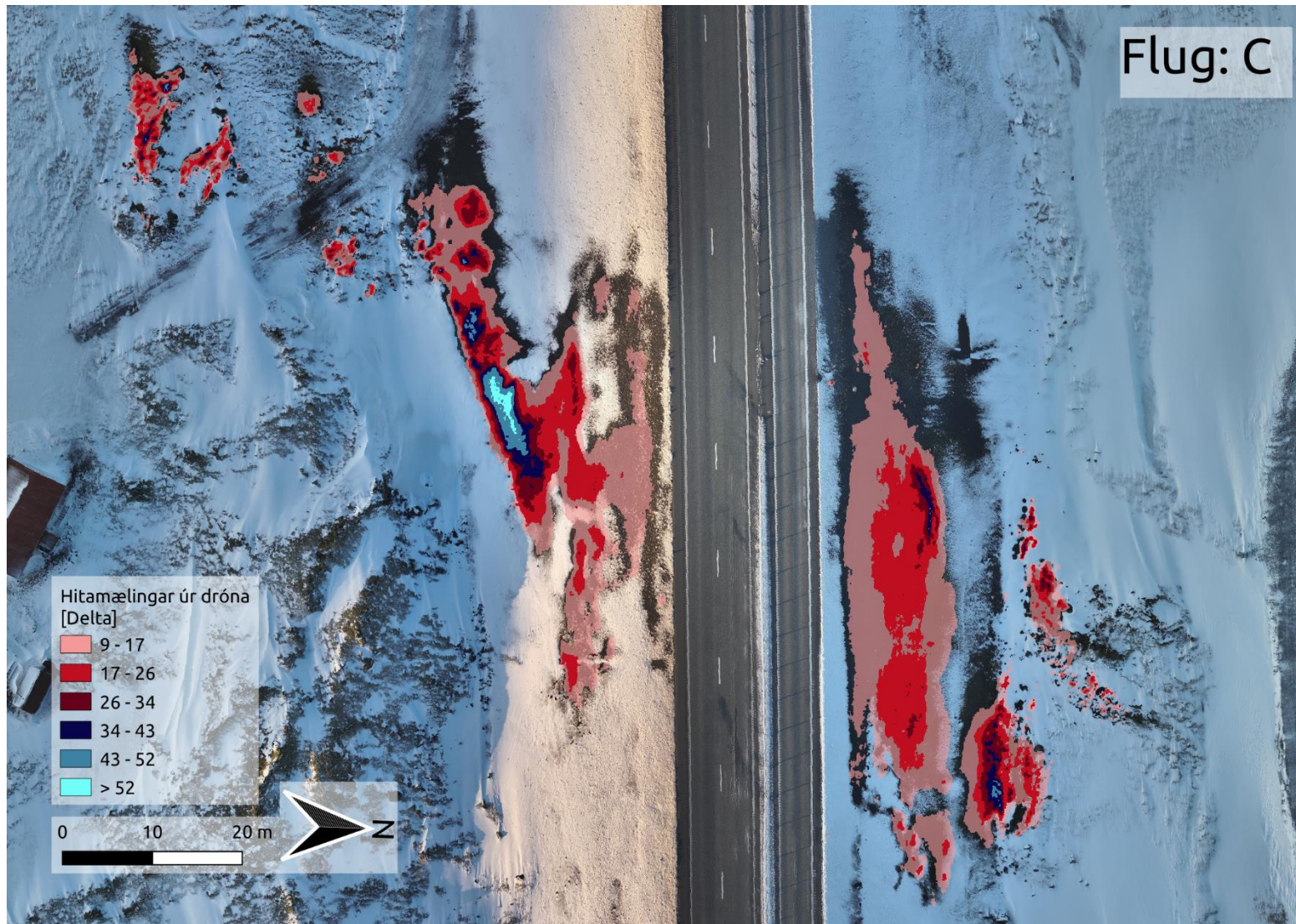
Kortlagningin sýnir að þrátt fyrir greinilega jarðhitavirkni í næsta nágrenni við veginn, virðist varmastraumurinn ekki ná upp á yfirborð vegarins sjálfs. Ef litið er aftur á kort 5 til 7 kemur í ljós að enginn augljós munur sést á yfirborðshita vegarins þegar borið er saman hverasvæðið og viðmiðunarsvæðin utan þess. Þetta getur komið á óvart þar sem malbik leiðir varma vel en líklegasta skýringin á þessu er hæðamunurinn. Á myndum 10 til 12 má sjá nokkuð skýra línu báðumegin við veginn sem gefur í skyn að jarðhitinn nái einungis upp í ákveðna hæð og meiri orku þyrfti í kerfið svo varminn næði upp í efsta lag vegarins. Eins og fram kom áðan var einungis skoðað það svæði sem sýndi mestu jarðvirkni í þessum kafla, er það ekki eina svæðið með slíka virkni. Annar vegkafla, um 120 m vestar, sýnir einnig merki um jarðhita í vegöxlum. Þetta má greina á myndum 5 til 7. Þrátt fyrir að varminn á þessu svæði sé nægur til að bræða snjó, er hann töluvert minni en á hinu svæðinu og því látið vera að skoða það frekar hér.



Mynd 10 - Delta hitastig sýnt á rgb mynd fyrir virkasta hverasvæðið (Flug A)



Mynd 11 - Delta hitastig sýnt á rgb mynd fyrir virkasta hverasvæðið (Flug B)



Mynd 12 - Delta hitastig sýnt á rgb mynd fyrir virkasta hverasvæðið (Flug C)

Niðurstöður þessa verkefnis sýna með afgerandi hætti að notkun dróna með hitamyndavél er afar gagnleg aðferð til að vakta jarðhitasvæði. Tæknin býður upp á möguleika til að kortleggja hitabreytingar á stórum svæðum á tiltölulega skömmum tíma með lágmarks mannafla. Samanburður mælinga við hefðbundinn hitamæli, þrátt fyrir nokkurn mun í mæligildum, staðfestir að dróninn gefur áreiðanlegar niðurstöður sem hægt er að nota til að fylgjast með breytingum yfir tíma. Rannsóknin sýnir fram á augljósa jarðvirkni við veginn í Hveradölum, sérstaklega á afmörkuðu svæði nálægt skátahúsinu. Þó er athyglisvert að sjá að yfirborð vegarins sjálfs hitnar ekki á þessu svæði.

Lykilþáttur í vöktun jarðhitasvæða er að geta borið saman hitamælingar frá mismunandi tímapunktum á skilvirknan máta. Í verkefninu kom í ljós að slíkur samanburður er ekki einfaldur vegna margra þátta sem hafa áhrif á hvaða gráðutala kemur út. Aðferðirnar sem notaðar voru í þessu verkefni til að einangra fyrir áhrifum jarðhita (sem sagt leiðréttu fyrir áhrif sólar og umhverfishita) reyndust gagnlegar en þó takmarkandi. Höfundur telur að ekki hafi tekist nógu vel að einangra áhrif jarðhita og þar að leiðandi erfitt að svara spurningunni: Er jarðhiti að færast í aukanna á svæðinu eða ekki? Niðurstöðurnar gefa vísbendingar um að allavega virðist ekki vera draga úr virkni yfir þessa 4 mánuði. Mikilvægt er að halda áfram að fylgjast með þróun jarðhita á svæðinu til að tryggja öryggi vegfaranda og fyrirbyggja skemmdir á veginum. Eftirfarandi punktar telja upp nokkur skref sem hægt væri að taka til að halda áfram með þetta verkefni:

- Framkvæma fleiri flug með styttra millibili til að fá fleiri gögn og betri mynd af jarðhitabreytingum á svæðinu.
- Þróa nákvæmari aðferðir til að jafna hitagögn fengin úr drónum svo hægt sé að bera þau saman á skilvirkari máta.
- Rannsaka möguleika á að nota gervigreind til að greina mynstur í hitabreytingum. (e. machine learning) líkön á borð við (e. random forest) gætu komið að gagni.