

HITAVEITA SELTJARNARNESS

Vinnslueftirlit 2023 -2024



Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness
Mars 2024

Titilsíða

Höfundar: Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil

Heiti skýrslu: HITAVEITA SELTJARNARNESS

Undirtitill: Vinnslueftirlit 2023 -2024

Unnið fyrir: Hitaveitu Seltjarnarness

Dags.: mars, 2024

Forsíðumynd: Hitamæling-efirlit

EFNISYFIRLIT

Verkfræðistofan Vatnaskil Hrefna Kristmannsdóttir	1
1. INNGANGUR	5
2. TILGANGUR VINNSLUEFTIRLITS OG JARÐHITAKERFIÐ Á SELTJARNARNESI.....	6
3. EFNAEFTIRLIT	9
5. MAT Á ÚTFELLINGAHÆTTU	20
6. EFNAJAFNVÆGI Í JARÐHITAKERFINU	22
7. VINNSLUGÖGN.....	24
8. MAGN OG HITASTIG FRAMRÁSAR OG BAKRÁSARVATNS.....	37
9. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR	38
10. HEIMILDIR.....	38
Viðauki 1	43

TÖFLUR

Tafla 1. <i>Vinnsluholur á Seltjarnarnesi.</i>	8
Tafla 2. <i>Efnasamsetning vatns úr holu SN-05-valin sýni.</i>	11
Tafla 3. <i>Efnasamsetning vatns úr holu SN-12-valin sýni.</i>	12
Tafla 4. <i>Efnasamsetning sýna úr holu SN-17.</i>	13
Tafla 5. <i>Mælingar á rafleiðni ($\mu\text{S}/\text{cm}$ við 25 °C) vatns úr holu SN-05 árið 2023.</i>	15
Tafla 6. <i>Mælingar á rafleiðni ($\mu\text{S}/\text{cm}$ við 25 °C) vatns úr holu SN-06 árið 2023.</i>	15
Tafla 7. <i>Mælingar á rafleiðni ($\mu\text{S}/\text{cm}$ við 25 °C) vatns úr holu SN-12 árið 2023.</i>	16
Tafla 8. <i>Mælingar á rafleiðni ($\mu\text{S}/\text{cm}$ við 25 °C) vatns úr holu SN-17 árið 2023.</i>	16
Tafla 9. <i>Eyður í sjálfvirkt rituðum gögnum árið 2023.</i>	24
Tafla 10. <i>Keyrsla á djúpdælum Hitaveitu Seltjarnarness 2023.</i>	25
Tafla 11. <i>Mánaðar meðaltal heildarrennslis áranna 1994 til 2023.</i>	26
Tafla 12. <i>Magn og meðalhitastig dælds vatns, framrásar- og bakrennslisvatns. Jafnframt magn selds vatns og hlutfallslegt “tap” kerfis.</i>	37
Tafla 13. <i>Mælióvissa fyrir mismunandi efni.</i>	44

MYNDIR

<i>Mynd 1. Mælingar á rafleiðni í holu SN-05 á árinu 2023.</i>	17
<i>Mynd 2. Breytingar í rafleiðni með tíma, hola SN-05.</i>	17
<i>Mynd 3. Mælingar á rafleiðni í holu SN-06 á árinu 2023.</i>	18
<i>Mynd 4. Breytingar í rafleiðni með tíma, hola SN-06</i>	18
<i>Mynd 5. Mælingar á rafleiðni í holu SN-12 á árinu 2023.</i>	19
<i>Mynd 6. Breytingar á rafleiðni með tíma, hola SN-12.</i>	19
<i>Mynd 7. Mælingar á rafleiðni í holu SN-17 á árinu 2023.</i>	20
<i>Mynd 8. Breytingar á rafleiðni með tíma, hola SN-17.</i>	20
<i>Mynd 9. Kalsítmettun í holu SN-05 á móti mældum hita. Línan sýnir fræðilegt jafnvægi og punktarnir tilsvareandi jónamargfeldi vatnsins. Gildi fyrir sýnið frá 2023 er merkt á myndinni og fyrir sýni frá 2022 til samanburðar</i>	21

Mynd 10. Kalsítmettun í holu SN-12	21
Mynd 11. Kalsítmettun í tveimur sýnum úr holu SN-17 frá árinu 2023 á móti mældum hita. Línan sýnir fræðilegt jafnvægi og punktarnir tilsvareandi jónamargfeldi vatnsins.	22
Mynd 12. Útreiknað jafnvægi við ýmsar helstu ummyndunarsteindir á móti hita fyrir vatnssýni þar sem vatnskerfið er í jafnvægi við um 150 °C hita. Núlllínan sýnir jafnvægisástand við það hitastig sem línurnar skera hana og er viðkomandi	23
Mynd 13. Útreiknað jafnvægi við ýmsar helstu ummyndunarsteindir á móti hita fyrir vatnssýni úr holu SN-05 árið 2023. Núlllínan sýnir jafnvægisástand við það hitastig sem línurnar skera hana og er viðkomandi steind þá í jafnvægi.	23
Mynd 14. Útreiknað jafnvægi við ýmsar helstu ummyndunarsteindir á móti hita fyrir vatnssýni úr holu SN-12 og úr holu SN-17, bæði tekin í október 2023. Núlllínan sýnir jafnvægisástand við það hitastig sem línurnar skera hana og er viðkomandi steind þá í jafnvægi.	24
Mynd 15. Rennsli úr holu SN-05.	28
Mynd 16. Rennsli úr holu SN-06.	28
Mynd 17. Rennsli úr holu SN-12.	29
Mynd 18. Rennsli úr holu SN-17.	29
Mynd 19. Heildarrennsli úr öllum vinnsluholum á Seltjarnarnesi.	30
Mynd 20. Heildarrennsli úr vinnsluholum á Seltjarnarnesi 1996-2023. Sýnt er klukkustundargildi, mánaðarmeðalrennsli og ársmeðalrennsli.	30
Mynd 21. Hitastig í holu SN-05.	31
Mynd 22. Hitastig í holu SN-06.	31
Mynd 23. Hitastig í holu SN-12.	32
Mynd 24. Hitastig í holu SN-17.	32
Mynd 25. Mælt vatnsborð í holu SN-01 frá 1972-2023. Handmælingar eru bláar og síritaðar mælingar rauðar. Bláu punktarnir eru mælingar frá hljóðhraðamæli sem eru ekki marktækar.	33
Mynd 26. Mælt vatnsborð í holu SN-02 frá 1972-2023. Handmælingar eru bláar og síritaðar mælingar rauðar.	33
Mynd 27. Mælt vatnsborð í holu SN-03 frá 1972-2023. Handmælingar eru bláar og síritaðar mælingar rauðar.	34
Mynd 28. Mælt vatnsborð í holu SN-04 frá 1972-2023. Handmælingar eru bláar og síritaðar mælingar rauðar.	34
Mynd 29. Mælt vatnsborð í holu SN-05 frá 1972-2023.	35
Mynd 30. Mælt vatnsborð í holu SN-06 frá 1972-2023.	35
Mynd 31. Mælt vatnsborð í holu SN-12 frá 1972-2023.	36
Mynd 32. Mælt vatnsborð í holu SN-17 árið 2023.	36

1. INNGANGUR

Vinnslueftirlit með jarðhitasvæðinu á Seltjarnarnesi á árinu 2023 er kynnt í þessari skýrslu. Gerð og umfang skýrslunnar miðast við samning milli Hitaveitu Seltjarnarness, Hrefnu Kristmannsdóttur og Vatnaskila ehf. frá árinu 2002 og síðari viðauka. Inn í skýrsluna eru líka tekin önnur atriði sem varða vinnslu eins og fram kemur hér á eftir.

Teknar eru saman mælingar á efnainnihaldi vinnsluvatns úr borholum veitunnar, bæði árlegum heildargreiningum og vikulegum mælingum starfsmanna á rafleiðni. Einnig eru tekin saman gögn um vatnsvinnslu árið 2023, bæði úr sjálfvirku gagnaskráningakerfi og mælingum starfsmanna veitunnar á vettvangi.

Sýni til heildargreininga eru venjulega tekin að haustlagi eftir hvíld svæðanna yfir sumarið og s.l. haust voru sýnin tekin þann 12. október úr holum SN-05, SN-12 og holu SN-17

Starfsmenn veitunnar tóku vikuleg sýni til mælinga á rafleiðni vatnsins (leiðni) allt árið í þeim vinnsluholum sem voru í gangi hverju sinni. Rafleiðni vatns er mælikvarði á seltu þess og mjög auðveld í mælingu og sýnataka jafnframt einföld. Seltan hefur mikil áhrif á vinnslueiginleika vatnsins og þar sem sumar borholurnar eru mjög nálægt ströndinni er möguleiki á innstreymi sjávar inn í jarðhitakerfið við lækkaðan þrýsting vegna vinnslu. Mikilvægt er því að fylgjast reglulega með þessum þætti. Vatnið er nú þegar talsvert salt og seltuaukning eykur bæði stáltæringu og útfellingahraða í vatninu.

Rennsli og hiti voru mæld sjálfvirkt á klukkutíma fresti í holum SN-05, SN-06, SN-12 og SN-17 þegar þær voru í gangi. Einnig voru mæld sjálfvirkt gildi fyrir heildardælingu, bakrennsli og magn vatns, sem fór út á kerfið og hitastig hvers fyrir sig. Rennslismælir í holu SN-12 hefur verið bilaður í rúmt ár en nýr mælir var settur á leiðslu frá holunni í byrjum maí 2023. Á meðan hann var bilaður hefur þurft að áætla rennsli úr holunni með því að reikna mun þess sem dælt var upp úr holum og bakrásarvatns annars vegar og mældri framrás hins vegar. Samkvæmt samanburðarmælingum með áspenntum rennslismæli var mismunur mælinga fyrir SN-12 nánast eins og sá reiknaði. Eftir að skipt var um mælinn fer munur á milli mælinga á rennsli úr holunum og mismunur framrásar og bakrásar ekki yfir 2 L/s. Því miður kom svo upp bilun í skráningarkerfi SN-17 11. október 2022 og tókst ekki að laga hana fyrr en eftir áramót. Því þurfti að áætla rennsli úr þeirri holu fram til áramóta og gögn um hitastig voru aðeins til frá vikulegri mælingu og sem áætlun út frá hitamælingum á heildarinnrennsli í dælustöð. Send er út sjálfvirkt mánaðarlega til okkar skýrsla frá skráningar-kerfinu með helstu vinnsluþáttum. Enn sem komið er þarf að reikna út meðaltöl helstu vinnsluþátta handvirkt, en til stendur að forrita kerfið þannig að það verði sjálfvirkt, bæði mánaðarlega og í lok árs. Mun það spara talsverða handavinnu við bæði uppgjör og skýrslugerð til Orkustofnunar.

Vatnsborð var eingöngu handmælt í vinnsluholunum. Í athugunarholunum, SN-01, SN-02 og SN-03 er vatnsborð mælt með vatnsborðsmæli, sem er þeirrar gerðar að þegar nemanum er rennt niður í opna holu og komið er í vatn leiðir hann rafstraum og þá heyrir hljóðmerki. Slíkar mælingar voru gerðar vikulega. Auk þessa hefðbundna mælis er samhliða notaður hljóðhraðamælir. Í holu SN-01 virkar þessi búnaður ekki nógu vel vegna vatnsrennslis við fóðurrösenda og eru margar mælingar í henni ómarktækar. Síritandi mælir frá Stjörnuodda eru nú jafnframt í holum SN-01, SN-02, SN-03 og SN-04. Bætur þetta verulega upplýsingar um vatnsborð á svæðinu, en því miður láðist að tappa gögnum af mælunum og því fyllist minnið og ekki eru til gögn úr þeim nema hluta árs. Verður bætt úr þessum vanköntum og væntanlega stilltir inn aflestrar með lengra millibili svo hver mælir geti safnað gögnum yfir heilt ár.

Í vinnsluholunum eru þrýstingsmælingar notaðar til að mæla vatnsborðið með þeim hætti að í gegnum mjótt stálrör, sem liggur niður að enda dælu, er leitt köfnunarefnisgas undir þrýstingi. Þrýstimælir á gasleiðslunni sýnir, þegar þrýstingur er kominn í jafnvægi, þrýsting vatnssúlunnar sem liggur ofan við enda rörsins. Sé hann umreiknaður í fjölda metra af vatnssúlu af tilsvarendi hita og er í holunni og dreginn frá dýpinu frá yfirborði niður á rörenda, fæst dýpi niður á vatnsborð í borholunni. Þessi búnaður er bilaður í holi SN-06, sem er bagalegt því þá er óvíst um áhrif dælingar á vatnsborð í holunni og nokkur óvissa um á hversu miklum afköstum má keyra hana. Sverrir Þórhallsson verkfræðingur hefur útbúið töflu fyrir starfsmenn til að áætla vatnsborð frá afli mótors og stemma þeir reikningar vel fyrir holi SN-17 svo starfsmenn nota samsvarandi töflu og fyrir SN-17 með nokkrum varúðarstuðli til að meta líklegt vatnsborð í SN-06. Mjög æskilegt væri þó að geta sem fyrst fengið raunverulegar mælingar af stað aftur. Vatnsborðsmælingar voru gerðar vikulega árið 2023 í holum SN-05, SN-12 og SN-17. Dæla er á um 160 m dýpi (161,1 m) í SN-17 en í hinum vinnsluholunum á um 140 m dýpi (139,7 m).

Öll vinnslugögnin eru tekin saman í skýrslunni og sett fram í myndum og töflum og niðurstöður þeirra túlkaðar. Sambærilegt yfirlit og er í þessari skýrslu um vatnsvinnslu, hita og vatnsborð á jarðhitasvæðinu hefur verið tekið saman frá árinu 1988 og fylgst með breytingum í efnainnihaldi og vinnslueiginleikum jarðhitavatnsins (Hrefna Kristmannsdóttir og Þorsteinn Thorsteinsson, 1988, Hrefna Kristmannsdóttir o.fl., 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998, 1999, 2002, Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, Auður Ingimarsdóttir, o. fl., 1990, Vigdís Harðardóttir o.fl., 2000, Þorsteinn Thorsteinsson og Magnús Ólafsson, 1989).

Í skýrslunni er auk kaflanna um niðurstöður mælinga á vinnsluþáttum og efnainnihaldi vinnsluvatns almennur kafli (2) um tilgang vinnslueftirlits og eiginleika jarðhitakerfisins á Seltjarnarnesi. Þessi kafli er nánast eins og í skýrslu fyrri ára, en honum er haldið inni til skýringar fyrir lesendur sem ekki hafa þær skýrslur handbærar. Einnig er í skýrslunni kafli með gögnum úr skráningarkerfi veitunnar um magn og meðalhitastig bakrennslisvatns og heildarmagn og meðalhitastig framrásarvatns út á veituna. Jafnframt er tilgreint hvort og hversu mikið magn niðurrennslis var niður í jarðhitakerfið. Magn af seldu vatni er tilgreint samkvæmt upplýsingum skrifstofu Seltjarnarnesbæjar og hlutfallslegt “tap” í kerfinu reiknað. Þó þetta séu ekki gögn um áhrif vinnslu á jarðhitasvæðið eru þetta mikilvægar upplýsingar um rekstur hitaveitunnar og eru því höfð með í skýrslunni. Á síðustu árum hafa yfirvöld kallað eftir þessum gögnum ár hvert og við séð um að taka þau saman.

2. TILGANGUR VINNSLUEFTIRLITS OG JARÐHITAKERFIÐ Á SELTJARNARNESI

Efnaeftirlit með vinnsluvatni hefur þann tilgang að fylgjast með og meta mögulegar breytingar á vinnslueiginleikum þess. Jafnframt er unnt að sjá fyrir mögulegar breytingar á hitastigi vatnsins með rannsóknum á efnainnihaldi (Kristmannsdóttir and Ármannsson, 1996). Breytingar á efnainnihaldi koma oft fram mun fyrr en hitastigsbreyting mælist í vatninu vegna innstreymis af kaldara vatni inn í kerfið. Einnig geta efnabreytingar gefið til kynna skemmdir á fóðringum svo fátt eitt sé nefnt. Reglulegt efnaeftirlit, sem sniðið er að eiginleikum og vinnslu viðkomandi jarðhitasvæðis getur sparað hitaveitum mikla fjármuni og virkað sem trygging fyrir óvæntum áföllum. Til að unnt sé að reikna efnajafnvægi og efnahita í jarðhitavatni er nauðsynlegt að hafa efnagreiningu á flestum uppleystum efnum. Því þarf að taka sýni til slíkrar greiningar, svokallað heilsýni, með vissu

millibili og er það gert a.m.k. árlega. Sýnataka á heilsýni er nokkuð flókin og þarf sérfræðingur að framkvæma hana.

Jafnframt er nauðsynlegt að fylgjast oftast með einstökum þáttum, sem gefa ábendingar um breytingar og starfsmenn veitunnar geta framkvæmt sjálfir á einfaldan og ódýran hátt. Rafleiðni er góður mælikvarði á breytingar á seltu og heildarefnainnihald og mælingin er einföld og fljótleg. Það er því þáttur sem starfsmenn hitaveitna mæla yfirleitt sjálfir í vinnsluvatni, oftast vikulega.

Vatnið á Seltjarnarnesi er talsvert salt og þar sem selta virkar sem hvati á öll efnahvörf eins og tæringu og útfellingu er þörfin á virku efnaeftirliti enn brýnni. Kalkútfellingar eru þær útfellingar sem eru einna helst til vandræða í íslensku lághitavatni (Kristmannsdóttir, 1989). Vinnsluvatnið á Seltjarnarnesi hefur oft verið nokkuð yfirmettað af kalki og stundum nálægt þeim mörkum sem útfellingar geta orðið við. Á hverju ári er því fylgst með metnun kalksteindarinnar kalsíts í vatninu, en til að reikna hana út frá efnasamsetningu þarf að mæla talsvert marga efnabætti (heilsýni). Selta hvetur allar útfellingar og því geta steindir sem ekki ná að falla út í fersku jarðhitavatni við kælingu fallið út sé vatnið kælt mikið niður t.d. í snjóbræðslukerfum. Við lágt hitastig er útfelling kísils og kísilsteinda allajafna það hæg að þó yfirmettun náist þá verður ekki útfelling. Á Seltjarnarnesi sýnir reynslan að við kælingu jarðhitavatsins niður fyrir 20 °C verða útfellingar álsilikats og jafnvel ókristallaðs kísils. Því er ávallt mælt með að í varmaskiptum sé vatnið ekki kælt niður fyrir 20 °C og eru leiðbeiningar um það inni á heimasíðu Seltjarnarnesbæjar. Ekki hafa farið fram miklar rannsóknir á útfellingu álsilikata (Kristmannsdóttir et. al, 2004), en þessar ráðleggingar eru byggðar á reynslubundnum athugunum. Einnig þarf að fylgjast með mögulegu innstreymi andrúmslofts í vinnsluvatnið þar sem há selta vatnsins hraðar einnig súrefnistæringu. Brennisteinsvetni í vatninu eyðir súrefni og tengist jafnframt jární í aðveiturörum og myndar varnarhúð úr járnúlfíði (Kristmannsdóttir, 1989, Kristmannsdóttir et al., 2004). Styrkur brennisteinsvetnis í jarðhitavatninu á Seltjarnarnesi er fremur lágur og gæti ekki eytt háum styrk súrefnis sem kæmist inn í vatnið með andrúmslofti. Styrkur þess er þó það hár að það nær að mynda varnarhúð úr járnúlfíði innan á aðveiturörum. Frá efnagreiningum á öllum helstu uppleystum efnum (heildarefnagreiningum) eru reiknuð út ýmis efnajafnvægi í vatninu og fylgst með mögulegum breytingum á þeim. Reiknað er einnig út svokallað djúphitastig frá efnainnihaldi vatnsins, en það byggir á þeirri forsendu að efnainnihald breytist lítið þegar vatn streymir upp um borholur og sýni það því oft síðasta efnajafnvægi vatnsins við ummyndunarsteindir í berginu. Ummyndunarsteindir eru steindir sem verða til við niðurbrot frumsteinda bergsins vegna hvörfunar við heitt vatn í jarðhitakerfunum. Myndun þeirra og hvaða steindir myndast er verulega háð hitastigi. Samanburður á fræðilegu efnajafnvægi og raunverulegu efnajafnvægi í vatnssýnunum reiknað við mismunandi hitastig getur gefið mjög góðar vísbendingar um hitastig í jarðhitakerfum og í mismunandi vatnsæðum þess. Jafnframt getur hann sýnt yfirvofandi breytingar á hitastigi áður en þær verða mælanlegar (Kristmannsdóttir and Ármannsson, 1996).

Í jarðhitavatninu á Seltjarnarnesi er svokallaður kalsedónhiti talinn einna áreiðanlegastur til að meta djúphitastig í kerfinu. Kalsedónhiti byggist aðallega á styrk kísils í vatninu, sem er í beinu samhengi við hitastig í jarðhitakerfi. Kísilstyrkur breytist ekki mjög fljótt þó vatnið kólni þar sem útfelling kísils er hæg og sýnir styrkur hans því gjarnan síðasta jafnvæghitastig vatnsins og á því byggist hitamælirinn. Niðurstöður heilsýnagreininga í vatninu á Seltjarnarnesi eru ekki alltaf beint sambærilegar milli ára þar sem efnasamsetning ræðst af magnhlutföllum blöndu vatns úr mismunandi æðum, sem eru háð dælingarmagni hverju sinni og jafnframt því hvaða holur aðrar eru í vinnslu og magni dælingar úr þeim. Við túlkun niðurstaðna þarf að taka mið af ástandi holunnar, hitastigi og dælumagni og vinnslu úr henni og á vinnslusvæðinu mánuðina fyrir sýnatöku. Við mat á niðurstöðum efnagreininga frá mismunandi tímum þarf jafnframt að hafa í huga að

efnagreiningaraðferðir breytast með tímanum og með breyttri aðferð geta orðið einhver frávik í niðurstöðum.

Jarðhitakerfið á Seltjarnarnesi, sem hitaveitan vinnur vatn sitt úr, er fremur flókið og vinnslu- borholurnar vinna vatn úr misheitum og missöltum vatnsæðum (Kristmannsdóttir, H. and Tulinius, H. 2000, Hrefna Kristmannsdóttir og Axel Björnsson, 2014a, Kristmannsdóttir et. al, 2015, Kristmannsdóttir et. al. 2021). Í töflu 1 er sýnd tafla yfir sex vinnsluholur veitunnar, en fjórar þeirra eru nú virkjaðar og í vinnslu, SN-05, SN-06, SN-12 og hola SN-17. Hola SN-03 var aflögð fyrir nokkrum árum, en er notuð sem niðurdælingarhola þegar umframmagn af bakrásarvatni er tiltækt. Hola SN-04 laskaðist í mars 2021 og er ekki í notkun. Í töflu 1 er einnig sýnt mat á hámarks- afköstum hvernar holu, vinnsluhitastig þeirra og dýpi helstu vatnsæða (Hrefna Kristmannsdóttir og Axel Björnsson, 2014a, Hrefna Kristmannsdóttir og Vatnaskil, 2022). Eins og fram kemur í töflunni þá vinna holurnar vatnið á mismunandi dýpi og er það mjög misheitt. Selta vatnsins er einnig mishá. Lóðrétt má skipta jarðhitageyminum upp í þrjú meginvinnslusvæði eftir dýpi, sem gefa 55-140 °C heitt vatn. Talið er að hæsta seltan sé í efsta kaldasta vatnskerfinu, en einnig skiptir máli nálægð við sjó og vatnsgæfni holnanna. Þannig er hola SN-12 með saltasta vatnið, en ekki það heitasta. Hún er jafnframt sú hola sem fram að borun SN-17 hefur gefið mest vatn og talin vera næst aðaluppstreymissvæði jarðhitakerfisins. Hola SN-04 er stífluð á um 1030 m dýpi og virðast aðeins efri æðar holunnar gefa vatn nú. Allmiklar sveiflur í hitastigi og efnainnihaldi vatns eru í holu SN-05 og hún hefur grynntu vinnslufóðringuna af þeim vinnsluholum, sem eru í gangi, og tekur því inn vatn úr öllum þremur vatnskerfum svæðisins (Hrefna Kristmannsdóttir o.fl., 2001, Hrefna Kristmannsdóttir og Axel Björnsson, 2014a). Í holu SN-05 eru vatnsæðar þó ekki eins ofarlega og í holu SN-04.

Tafla 1. *Vinnsluholur á Seltjarnarnesi.*

	Borun lokið árið	Dýpi í m	Dýpt vinnslu- fôðringar í m	Vidd Vinnslu- fôðringar í "	Dýpi niður á dælu í m	Hámarks afköst L/s	Vinnslu- hitastig °C #	Dýpi helstu vatnsæða í m
SN-03*	1970	1715	99	9 ^{5/8}	-	15	100-105	230, 400, 930, 1700
SN-04**	1972	2025	172	9 ^{5/8}	-	35***	85-114	200, 390, 1190, 1980
SN-05	1981	2207	168	13 ^{5/8}	139,7	25	98-109	450, 560, 700, 2100
SN-06	1985	2701	414	13 ^{5/8}	139,7	25	116-121	535, 900, 2070, 2400
SN-12	1994	2714	791	10 ^{3/4}	139,7	35	96-113	1080, 2040
SN-17	2021	2057	394	10 ^{3/4}	160	35	98-112	700, 780, 920, 1280, 1940

*Aflögð hola ** Hola SN-04 nánast geryðilagðist í mars 2021 og hefur ekki verið í vinnslu síðan

Áætlað miðað við reynslu undanfarin ár.

*** Gefur nú aðeins brot af þessu magni vegna óhapps í mars 2021

Í holu SN-05 er æð á 2100 m dýpi sem er um 120 °C heit, en nokkrar æðar eru ofan 1000 m dýpis, sem gerir að hitastig vinnsluvatns úr holunni fer yfirleitt ekki mikið yfir 100 °C. Í holu SN-06 hafa sést nokkrar sveiflur í hitastigi og efnasamsetningu, og sýni sem tekin voru af mismunandi dýpi sýndu verulega mismunandi efnasamsetningu og jafnvægishitastig (Hrefna Kristmannsdóttir, 1994). Hún er mjög djúp, um 2700 m en fôðring er grynri í henni en holu SN-12, sem er álíka djúp. Heitasta æðin í SN-06 er líka verulega minna sölt en annað vatn í jarðhitakerfinu, 140 °C heit og er á 2400 m dýpi. Hún er eina holan sem hefur vatnsæð á svo miklu dýpi. Hola SN-12 tekur vatn sitt að mestu úr tveimur neðri kerfum svæðisins, en neðsta vatnsæðin er á 2040 m dýpi. Vinnsluhitastig vatn úr henni hefur alla jafna verið um 108 °C, en lægra við litla vinnslu og ívið hærra við meiri vinnslu. Eftir borun SN-17 hefur hitastig holunnar orðið mun breytilegra og lækkað talsvert að jafnaði. Í holu SN-17 eru heitar vatnsæðar á um 1280 og 1940 m dýpi en þar eru einnig kaldari vatnsæðar ofan 1000 m dýpis og virðist æð á um 780 m dýpi vera þeirra öflugust. Þegar lítið er dælt úr holunni er vatnið um og undir 100 °C, en við hámarksafköst um 34 L/s hækkar

hitastig vatnsins í allt að 112 °C. Við mikla dælingu úr SN-17 minnka afköst holu SN-12 verulega og hitastig vatnsins úr henni lækkar.

Vegna þessa mikla breytileika og hárrar seltu þarf að hafa reglulegt eftirlit með efnainnihaldi allra holnanna og skoða samspil þeirra í tengslum við vinnslumynstur og túlka breytingar út frá því. Selta vinnsluvatnsins á Seltjarnarnesi er nú allt að 14% af sjávarseltu í saltasta vatninu. Vatnið í vinnsluholunum varð stöðugt saltara með tímanum á árunum 1980-1990, en mjög hægði á þeirri þróun þegar vinnslan komst í meira jafnvægi eftir sölukerfisbreytingar og svæðisbundið vatnsborð á jarðhitasvæðinu hætti nær að lækka um langt skeið (Hrefna Kristmannsdóttir o.fl., 2001). Vatnsborð í vinnsluholunum hefur þó lækkað síðustu ár og selta vatns hefur aukist nokkuð í flestum þeirra.

Eins og fram kom hér að framan er selta ekki beint tærandi heldur er hún hvati á öll efnahvörf, þar á meðal súrefnistæringu og útfellingar. Vinnsluvatnið tærir stállagnir ekki verulega svo lengi sem súrefni kemst ekki inn í dreifikerfið. Þegar örlítið súrefni kemst inn í vatnið eins og gjarnan er í inntaksgrindum húsa verður tæring verulega hraðari í söltu vatni en fersku og stálofnar tærast mun hraðar og meira en þar sem nýtt er ósalt vatn. Því er í reglugerð veitustofnunar Seltjarnarnesbæjar kveðið á um að nota skuli forhitara eða pottofna í húskerfum. Flestar gerðir forhitara endast sémilega í vinnsluvatninu, en ending er breytileg eftir gerðum.

Hitaveita Seltjarnarness hefur frá því snemma á vinnslutímanum leitast við að hafa gott eftirlit með jarðhitasvæðinu og áhrifum vinnslu á það til að tryggja rekstraröryggi og geta brugðist strax við mögulegum breytingum. Verkfræðistofan Vatnaskil hefur frá 1994 séð um að vinna reiknilíkan og vinnsluspár fyrir jarðhitasvæðið á Seltjarnarnesi úr vinnslugögnum veitunnar (Verkfræðistofan Vatnaskil, 1994, 2002, 2016). Verkfræðistofan Vatnaskil ehf. tók að sér árlega úrvinnslu á vinnslugögnum Hitaveitunnar frá og með árinu 2002. Hrefna Kristmannsdóttir hefur unnið efnaeftirlitið og haft umsjón með vinnslueftirliti veitunnar frá því að það hófst. Hrefna hefur jafnframt verið ráðgjafi Hitaveitu Seltjarnarness með jarðhitanýtingunni.

3. EFNAEFTIRLIT

Sýni til heildarefnagreininga voru tekin þann 12. október úr holum SN-05, SN-12 og holu SN-17. Starfsmenn hitaveitunnar tóku jafnframt vikulega vatnsnýni úr þeim holum sem voru í gangi hverju sinni og mældu í þeim rafleiðni.

3.1 Heildarefnagreiningar sýna úr borholunum

Niðurstöður heildarefnagreininga á sýnum úr holu SN-05 eru í töflu 2, úr holu SN-12 í töflu 3 og úr SN-17 í töflu 4. Til samanburðar eru sýndar niðurstöður greininga á völdum eldri sýnum. Sýni til greininga á bæði málmum og anjónunum, klóríði, sulfati og flúoríði hafa verið send til greininga á rannsóknarstofunni ALS Analytica í Svíþjóð frá árinu 2002. Klóríð hefur einnig verið mælt með titrun í titrator (potentiometric titrun), en samanburðarmælingar hafa verið gerðar með þessum aðferðum s.l. ár og borið þokkalega vel saman. Greiningar á málmum voru áður gerðar á efnarannsóknastofu Orkustofnunar með annarri aðferð en anjónirnar (Cl^- , SO_4^{2-} , F^-) voru greindar með sömu aðferðum á báðum rannsóknarstofum.

Nánar er fjallað um aðferðir við efnagreiningar og sýnatöku í Viðauka 1.

Eins og fram kemur í töflu 2 þá var vatn úr holu SN-05 um 100 °C og dæling var rúmlega 25 L/s þegar sýnið var tekið. Bæði styrkur kísils og kalsedónhitastig voru talsvert há, eins og reyndar í sýni sem tekið var í janúar 2023. Sýnið er nokkru saltara en það sýni en samt ekki eins salt og sýni frá 2021. Hlutfall stöðugu samsætna vetnis og súrefnis ($\delta^{2}\text{H} \%$ og $\delta^{18}\text{O}$) er áþekkt og í flestum eldri sýnum úr holunni. Heildarkarbondat (CO_2) er í svipuðum styrk og í eldri sýnum, en brennisteinsvetni (H_2S) talsvert lægra en áður hefur mælst. Efnasamsetning vatnsins í holunni hefur ávallt sýnt talsverðar breytingar í kjölfar breytilegrar vinnslu. Það stafar væntanlega af því að við hvíld hitnar holan og kólnar svo þegar vinnslan eykst. Holan var í vinnslu meirihluta ársins, en mjög mismikið eftir mánuðum.

Hola SN-12 var 103,8 °C þegar sýnið var tekið og dæling um 10 L/s. Styrkur kísils mælist í lægra lagi og selta talsvert há þó hún hafi mælst hærri, eins og fram kemur í töflu 3. Gildi fyrir stöðugar samsætur vetnis og súrefnis ($\delta^2\text{H} \%$ og $\delta^{18}\text{O}$) eru mjög svipuð og verið hefur. Heildarkarbondat (CO_2) er í svipuðum styrk og áður en H_2S er í lægri kantinum, en svipað og í sýni árinu áður. Hola SN-12 hefur yfirleitt ekki sýnt miklar breytingar í efnainnihaldi né hitastigi milli ára, en nokkrar sveiflur hafa verið í seltu og kísilstyrk, væntanlega fyrst og fremst eftir dælumagni. Fóðring holunnar nær niður á 791 m dýpi og köldu efri æðarnar í jarðhitakerfinu eru því föðraðar af. Þær æðar sem gefa vatn eru á um 1080 og 2040 m dýpi og væntanlega gefa þær hlutfallslega mismikið eftir dælingu. Ávallt hafa þó verið minni sveiflur í hita og seltu í vinnsluvatni úr holu SN-12 en hinum holunum. Eftir að vinnsla var aukin í SN-17 lækkaði hitastig í SN-12 verulega og varð mjög sveiflukennt. Ljóst er að við mikla dælingu úr SN-17 tekur hún vatn frá SN-12, einkum úr neðrihluta vatnskerfisins. Þar sem holur SN-04 og SN-12 voru mjög tengdar og hola SN-17 jafnframt víðari en SN-12 kemur þetta ekki mikið á óvart.

Niðurstöður greininga á sýninu úr holu SN-17 eru í töflu 4. Hitastig holunnar var 111,7 við sýnatöku og dælt var um 9 L/s úr henni. Styrkur kísils er hár og hærri en í síðasta sýni. Selta holunnar mældist nokkru hærri en í síðasta sýni. Að jafnaði hefur holan verið verulega minna sölt en SN-12, talsvert saltari en SN-05 og einna líkust SN-06 að þessu leyti. Gildi fyrir stöðugar samsætur vetnis og súrefnis ($\delta^2\text{H} \%$ og $\delta^{18}\text{O}$) eru mjög svipuð og í vatni annarra holna. Af rokgjörnum efnum er heildarstyrkur karbondats (CO_2) mjög svipaður og í vatni annarra holna, og áður hefur mælst í holunni. Í þessu sýni mældist lágur styrkur H_2S , en í fyrri sýnum var hann undir næmnimörkum mæliaðferðarinnar. Ekkert súrefni mældist í vatninu frekar en í vatni annarra holna.

Tafla 2. Efnasamsetning vatns úr holu SN-05-valin sýni.

Sýnanúmer	1998-0598	HK02-0029	HK-04-202	HK-09-053	HK-12-004	HK-14-002	HK-15-002	HK-17-007	HK-18-004	HK-19-004	HK-21-007	HK-23-001	HK-23-004
Dagsetning	98-11-26	02-09-23	04-02-26	09-10-08	24.10.2012	29.10.2014	13.10.2015	11.10.2017	22.10.2018	22.10.2019	10.11.2021	9.1.2023	12.10.2023
Hitastig °C	102,2	98,8	99,8	101,8	107,6	99,2	101,2	100,6	97,8	100,1	89,0	100,0	99,9
Rennslí L/s	-	-	-	-	-	-	12,2	18,2	22,7	20,5	16,7	18,7	25,4
pH/°C	8,5/21	8,39/23	8,43/21	8,48/21	8,5/22	8,5/20	8,41/22	8,4/16	8,45/18	8,42/23	8,45/20	8,49/20	8,47/18
Heildar karbónat (CO ₂)	8,3	3,3	6,1	5,9	5,6	5,7	5,8	6,6	4,8	3,7	5,5	5,3	4,8
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	0,27	0,175	0,17	0,22	0,3	0,18	0,22	0,21	0,18	0,22	0,20	0,19	0,12
Bór (B) mg/L	0,21	0,20	0,207	0,224	0,242	0,22	0,226	0,219	0,24	0,229	0,20	0,22	0,24
Leiðni µS/cm	3300	4760	4410	4250	3700	4670	4625	4845	5080	4820	5100	4425	4929
Kísill (SiO ₂) mg/L	110,8	101,4	106,6	124,7	138,6	108,9	119,8	108,8	109,7	96,6	111,6	117,4	108,0
Heildar uppl. mg/L	2322	2610	2572	2201	2094	2699	2745	2750	2993	3094	3035	2524	2972
Súrefni O ₂ mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Natríum(Na) mg/L	433	508	539	520	467	559	574	567	645	594	601	524	613
Kalíum (K) mg/L	11,3	10,6	10,9	11,1	10,4	11,9	12,9	13,6	13,7	12,8	12,9	11,3	13,1
Magnesíum Mg mg/L	0,16	0,28	0,296	0,253	0,092	0,297	0,330	0,311	0,469	0,382	0,538	0,293	0,42
Kalsíum (Ca) mg/L	292	354	346	351	280	386	402	411	451	400	440	356	394
Strontíum mg/L	-	1,31	1,19	1,21	1,24	1,38	1,35	1,33	1,59	1,48	1,44	1,22	1,49
Flúoríð (F) mg/L	0,79	0,78	0,89	0,95	0,56	0,75	1,1	1,0	1,1	0,50/1,0#	0,8	0,86	0,829
Klóríð (Cl) mg/L	1097	1400	1340	1300	1000	1390	1379	1350	1520	1560	1610	1290	1590
Brómíð (Br) mg/L	3,6	4,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Súlfat (SO ₄) mg/L	206	226	224	241	193	238	251	215	248	197	253	210	249
Ál (Al) mg/L	0,017	0,020	0,032	0,018	0,042	0,020	0,022	0,021	0,018	0,017	0,020	0,023	0,019
Járn (Fe) mg/L	0,005	0,003	0,009	0,002	0,022	0,066	0,005	0,003	<0,002	<0,002	0,005	0,007	0,005
Mangan (Mn) mg/L	0,007	0,006	0,006	0,006	0,004	0,007	0,007	0,007	0,008	0,007	0,009	0,007	0,008
Radon Bq/L	-	9,7	1,8	-	0,42	1,4	-	-	-	-	-	-	-
Kadmíum (Cd) µg/L		0,0142	0,024	<0,02	<0,04	0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,06	<0,02	<0,02
Krómi (Cr) µg/L		0,035	<0,05	<0,04	0,091	0,119	0,106	<0,04	0,047	0,044	<0,04	<0,04	0,615
Kopar (Cu) µg/L		0,132	<0,4	<0,2	<0,4	<0,02	0,483	0,215	<0,2	<0,2	0,255	0,30	<0,2
Kvikasilfur (Hg) µg/L		-	0,002	0,057	0,002	0,063	0,218	0,010	<0,002	0,011	0,007	0,006	0,013
δ ² H ‰	-73,0	-72,7	-74,2	-73,8	-74,71	-	-73,56	-72,61	-72,89	-73,25	-70,77	-73,21	-72,18
δ ¹⁸ O ‰	-10,46	-10,46	-10,40	-10,68	-10,59	-10,45	-10,52	-10,50	-10,45	-10,35	-10,33	-10,55	-10,59
kalsedónhiti °C ¹	115	109	112	122	129	113	120	114	114	106	115	118	113

-ekki mælt, ¹ Fournier, 1977 ; # Leiðrétting barst í október 2020 frá ALS rannsóknarstofu eftir að ítrekun hafði verið hunsuð lengi

Tafla 3. Efnasamsetning vatns úr holu SN-12-valin sýni.

Sýnanúmer	1999-0128	HK-03-202	HK-07-029	HK-09-055	HK-11-012	HK-13-008	HK-16-003	HK-18-006	HK-19-005	HK-20-005	HK-21-001	HK-21-006	HK-22-003	HK-23-003
Dagsetning	99-04-29	03-10-23	07-10-15	09-10-08	11-10-18	2.10.2013	25.10.2016	22.10.2018	22.10.2019	29.10.2020	18.10.2021	10.11.2021	14.10.2022	12.10.2023
Hitastig °C	108,4	106	108,5	110,4	105	108	107,5	106,9	107,4	106,5	99,0	108,9	107,9	103,8
Rennsli L/s	-	-	-	-	-	-	16,5	16,7	25,8	20,2	3,0	14,0	9,5	10,1
pH/°C	8,4/23	8,42/20	8,39/20	8,43/20	8,36/20	8,38/20	8,46/18	8,33/20	8,36/19	8,47/19	8,25/18	8,44/20	8,28/22	8,32/20
Heildar karb. (CO ₂)	5,3	4,2	8,1	5,2	3,5	4,4	6,1	4,8	3,8	4,2	4,6	3,6	4,2	4,5
Brennst.vetni (H ₂ S)	0,15	0,127	0,12	0,13	0,09	0,13	0,15	0,09	0,12	0,13	-	0,11	0,07	0,06
Bór (B) mg/L	0,21	0,20	0,24	0,24	0,26	0,25	0,234	0,276	0,26	0,24	0,32	0,267	0,278	0,28
Leiðni µS/cm	5470	5610	5550	5750	6440	6530	6105	6715	6740	6614	8940	6844	6665	7218
Súrefni O ₂ mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Kísill (SiO ₂) mg/L	104,6	91,8	108,7	115,6	115,5	103,1	99,2	97,7	89,6	96,2	100,3	97,3	101,1	98,6
Heildar uppl. mg/L	3240	3491	3702	3194	3971	3721	3685	3950	4086	3792	5011	3890	3905	4319
Natríum(Na) mg/L	607	665,8	693	634	706	704	689	813	789	750	961	743	773	844
Kalíum (K) mg/L	12,6	12,4	14,0	13,1	15,2	14,8	13,6	14,6	16,1	14,8	19,3	15,6	13,7	17,2
Magnesium (Mg) mg/L	0,27	0,330	0,410	0,336	0,505	0,38	0,355	0,495	0,551	0,505	1,58	0,482	0,59	0,964
Kalsíum (Ca) mg/L	500	548,2	611	567	646	552	609	658	639	618	861	685	678	645
Strontíum (Sr) mg/L	-	2,34	2,80	2,42	2,95	2,42	2,47	2,85	2,82	2,92	3,44	2,97	2,72	3,06
Baríum (Ba) mg/L	-	-	0,061	0,056	0,062	0,057	0,060	0,058	0,064	0,059	0,07	0,067	0,059	0,060
Flúoríð (F) mg/L	0,78	0,67	0,61	0,81	0,9	0,6	0,76	0,83	0,39/0,91#	0,79	<0,4	0,626	0,65	0,732
Klóríð (Cl) mg/L	1630	1870	1920	1860	2120	2010	1970	2040	2220	1990	2680	2030	2020	2360
Súlfat (SO ₄) mg/L	286	300	351	333	363	332	297	320	326	316	382	313	313	348
Ál (Al) mg/L	0,028	0,02	0,022	0,022	0,024	0,015	0,020	0,018	0,016	0,022	0,014	0,020	0,016	0,015
Járn (Fe) mg/L	0,003	<0,02	0,023	0,010	0,008	0,006	0,009	0,008	0,004	0,007	0,011	0,006	0,008	0,010
Kadmíum (Cd) µg/L	-	-	<0,02	<0,02	0,025	<0,02	0,0737	<0,02	<0,02	<0,02	<0,06	<0,06	<0,02	<0,02
Mangan (Mn) mg/L	-	-	0,012	0,011	0,015	0,013	0,012	0,017	0,017	0,015	0,036	0,015	0,017	0,024
Króm (Cr) µg/L	-	-	0,323	0,081	<0,04	<0,04	0,319	0,065	0,071	<0,04	0,06	0,05	0,07	0,056
Kopar (Cu) µg/L	-	-	0,245	<0,2	<0,02	0,655	0,212	<0,2	<0,2	<0,02	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Kvikasilfur (Hg) µg/L	-	-	0,019	0,069	<0,002	0,002	0,005	0,014	0,010	0,021	0,009	0,009	0,126	0,011
Radon Bq/L	-	1,0	-	-	-	1,27	1,72	-	-	-	-	-	-	-
δ ² H‰	73,1	-71,6	-72,95	-74,5	-71,96	-70,18	-71,36	-73,64	-71,06	-70,81	-	-71,53	-71,09	-72,10
δ ¹⁸ O‰	-10,47	-10,42	-10,43	-10,68	-10,38	-10,56	-10,56	-10,39	-10,38	-10,29	-	-10,53	-10,40	-10,41
kalsedónhiti°C ¹	111	103	113	117	118	110	108	107	102	105	109	107	109	108

-ekki mælt, ¹ Fournier, 1977; # Leiðrétting barst í október 2020 frá ALS rannsóknarstofu eftir að ítrekun hafði verið hunsuð lengi

Tafla 4. Efnasamsetning sýna úr holu SN-17.

Sýnanúmer	HK-22-001	HK-22-004	HK-23-002	HK-23-005
Dagsetning	14.10.2022	12.12.2022	9.1.2023	12.10.2023
Hitastig °C	91,4	108,5	111,1	111,7
Rennsli L/s	5,6	23,9	32,2	8,7
pH/°C	8,09/22	8,45/14	8,39/20	8,39/19
Heildarkarbonsat CO ₂ mg/L	3,90	5,40	3,80	3,8
Brennisteinsvetni H ₂ S mg/L	<0,03	<0,03	<0,03	0,04
Bór B mg/L	0,33	0,26	0,23	0,24
Leiðni µS/cm	7340	5645	5925	5560
Kísill SiO ₂ mg/L	104,6	121,1	108,2	118,9
Heildar uppleyst efni mg/L	4298	3190	3255	3379
Súrefni O ₂ mg/L	0	0	0	0
Natríum Na mg/L	888	680	629	643
Kalíum K mg/L	16,5	14,2	12,9	14,8
Magnesium Mg mg/L	1,12	<0,4	0,342	0,269
Kalsíum Ca mg/L	710	519	497	478
Strontíum Sr/mg/L	2,47	2,38	2,22	2,37
Flúoríð F mg/L	0,48	0,577	0,80	0,81
Klóríð Cl mg/L	2220	1580	1720	1820
Súlfat SO ₄ mg/L	353	270	284	300
Ál Al mg/L	0,009	0,023	0,026	0,022
Járn Fe mg/L	0,038	0,005	0,006	0,004
Mangan Mn mg/L	0,020	0,010	0,008	0,006
Kadmíum Cd µg/L	0,020	<0,02	<0,02	<0,,02
Króm Cr µg/L	0,059	0,065	<0,04	0,102
Kopar Cu µg/L	<0,2	<0,2	0,27	<0,2
Kvikasilfur Hg µg/L	0,013	0,013	0,012	0,010
δ ² H%	-70,4	-71,12	-72,06	-72,75
δ ¹⁸ O	-10,04	-10,38	-10,48	-10,56
Kalsedónhiti °C	112	121	113	120

4.3. Rafleiðnimælingar

Rafleiðni vatns er mæling á eiginleikum vatnsins til að leiða rafstraum. Hreint vatn er mjög lélegur leiðari en jónir uppleystra salta í vatninu leiða rafstrauminn. Því fleiri jónir sem eru uppleystar í vatninu því betur leiðir vatnslausnin rafstraum. Jónir með hærri hleðslu leiða einnig strauminn betur en jónir með lægri hleðslu (Schwartz and Zhang, 2003). Hækkandi hiti eykur einnig rafleiðnina. Rafleiðni vatnslausna með sama hitastig fer þannig eftir styrk uppleystra efna á jónaformi í vatninu og er mælikvarði á heildarstyrk uppleystra efna og seltu vatnsins.

Fræðilega ætti rafleiðnin að vera í beinu samhengi við heildarefnastyrk vatnsins. Hins vegar fer það eftir hvaða efni eru uppleyst hver leiðnin er, þar sem hún er einnig háð stærð og hleðslu jónanna. Fyrir vatnslausnir með margskonar mismunandi jónir eins og í náttúrlegu vatni er rafleiðnin því ekki nákvæm mæling á heildarstyrk uppleystra efna, en er gott viðmið fyrir breytingar á styrknum. Breytingar á sumum efnum koma þó betur fram í rafleiðnimælingu en með beinni mælingu á uppleystum efnum með þurreimun þar sem þá hverfa rokgjörn efni eins og karbónat (tot. CO₂) sem skiptir verulegu máli íslensku vatni. Seltubreyting kemur strax fram með mælingu á rafleiðni.

Mæling á rafleiðni er einföld og krefst ekki flókinnar sýnatöku eða meðhöndlunar sýna til að gefa marktækar niðurstöður. Mælitækið er jafnframt einfalt og fremur ódýrt. Það er því tilvalin aðferð fyrir hitaveitur að mæla sjálfar reglulega rafleiðni í vinnslusýnum úr borholum til að fylgjast með mögulegum breytingum á efnainnihaldi, einkum seltubreytingum. Sjáist einhverjar óvæntar breytingar geta þær síðan kallað til sérfræðing í jarðefnafræði jarðhita til að kortleggja og skýra hvað er á ferðinni. Bæði er sparnaður að því að starfsmenn hitaveitunnar annist sjálfir slíkar mælingar og jafnframt þá fá þeir meiri tilfinningu og skilning fyrir því hvernig kerfið virkar. Rafleiðnimælingarnar eru m.a. ætlaðar sem viðvörunartæki fyrir starfsmenn hitaveitunnar til að sjá fljótt ef einhverjar breytingar eru að verða í jarðhitakerfinu. Því er mjög æskilegt að mælingar séu gerðar fljótlega eftir sýnatöku.

Hitaveita Seltjarnarness hefur séð um vikulegar mælingar á rafleiðni í veitunni frá árinu 2000. Fyrir árið 2000 voru sýni sem þeir söfnuðu send til mælingar á völdum efnum, einkum klóríði, á efnarannsóknarstofu. Góð regla hefur jafnan verið á mælingum hjá Hitaveitu Seltjarnarness og var það einnig s.l. ár.

Mælingar á rafleiðni í vinnsluvatni úr holum SN-05, SN-06, SN-12 og SN-17 á árinu 2023 eru sýndar í töflum 5, 6, 7 og 8. Þar sem sýnin eru mörg og ná yfir mismunandi rekstrarskilyrði ættu þau að sýna nokkuð vel langtímabreytingar auk sveiflna sem stafa af mismunandi vinnslu.

Á myndum 1, 3, 5 og 7 eru mælingar á rafleiðni sýndar á móti tíma fyrir hverja holu fyrir sig á árinu 2023. Á tímaásnum eru sýndar dagsetningar sýnatöku, hvort sem viðkomandi hola var í vinnslu eða ekki. Þannig kemur jafnframt fram hvenær viðkomandi hola var í vinnslu og hvernig leiðnin tengist upphafi og lengd dælingar. Á myndum 2, 4, 6 og 8 eru sýndar mælingar á rafleiðni með tíma frá upphafi vinnslu úr holum SN-05, SN-06 og SN-12. Þessar myndir sýna allar mælingar á sýnum úr holunum þegar þær voru í vinnslu og tímaskalinn er því ekki jafn. Sameiginlegt með þeim er að selta og þar með leiðni hækkar að jafnaði við aukna vinnslu í holunum og því má greina árssveiflu þegar vinnsla er óslitin.

Tafla 5. Mælingar á rafleiðni ($\mu\text{S}/\text{cm}$ við $25\text{ }^\circ\text{C}$) vatns úr holu SN-05 árið 2023.

Dagsetning	Leiðni í $\mu\text{S}/\text{cm}$	Dagsetning	Leiðni í $\mu\text{S}/\text{cm}$	Dagsetning	Leiðni í $\mu\text{S}/\text{cm}$
6.1.2023	4390	5.5.2023	4740	6.10.2023	4990
13.1.2023	4430	12.5.2022	4780	13.10.2023	5260
20.1.2023	4500	19.5.2023	4800	20.10.2023	5010
3.2.2023	4500	26.5.2023	4910	27.10.2023	4990
10.2.2023	4540	2.6.2023	4970	3.11.2023	4960
17.2.2023	4460	16.6.2023	5120	10.11.2023	4930
24.2.2023	4500	23.6.2023	5110	15.11.2023	4970
3.3.2023	4450	30.6.2023	5040	17.11.2023	4900
10.3.2023	4450	7.7.2023	5240	24.11.2023	4860
17.3.2023	4400	14.7.2023	4950	1.12.2023	4890
24.3.2023	6620	4.8.2023	4980	8.12.2023	4860
31.3.2023	4300	1.9.2023	3980	15.12.2023	4950
14.4.2023	4300	8.9.2022	4150	22.12.2023	4900
21.4.2023	4390	22.9.2023	4870	29.12.2023	5190
28.4.2023	4570	29.9.2023	4980		

Tafla 6. Mælingar á rafleiðni ($\mu\text{S}/\text{cm}$ við $25\text{ }^\circ\text{C}$) vatns úr holu SN-06 árið 2023.

Dagsetning	Leiðni í $\mu\text{S}/\text{cm}$	Dagsetning	Leiðni í $\mu\text{S}/\text{cm}$	Dagsetning	Leiðni í $\mu\text{S}/\text{cm}$
6.1.2023	6630	3.2.2023	6420	3.3.2023	6190
13.1.2023	6450	10.2.2023	6250	10.3.2023	6210
20.1.2023	6690	17.2.2023	6380	29.12.2023	7190
27.1.2023	7000	24.2.2023	6230		

Í holu SN-05 var rafleiðni nokkuð svipuð og árið 2022. Framan af ári var hún heldur lægri, en hækkaði heldur þegar leið á árið. Rafleiðni vatns úr holunni er að jafnaði miklu lægri í en í hinum holunum. Í holunni eru ekki vatnsæðar ofarlega úr efsta kalda vatnskerfinu, en þó eru í henni æðar ofar en í þeim holum öðrum sem nú eru í vinnslu. Að jafnaði virðist að því heitara vatn sem hún gefur því lægri sé selta þess.

Í holu SN-06 er rafleiðni vinnsluvatnsins nokkru hærri en undanfarin ár, en hún var lítið í vinnslu á árinu.

Í holu SN-12 er rafleiðni hærri að jafnaði en á árinu 2022 og toppar með mjög hárra leiðni koma fram eins og á árinu 2022.

Tafla 7. Mælingar á rafleiðni ($\mu\text{S}/\text{cm}$ við $25\text{ }^\circ\text{C}$) vatns úr holu SN-12 árið 2023.

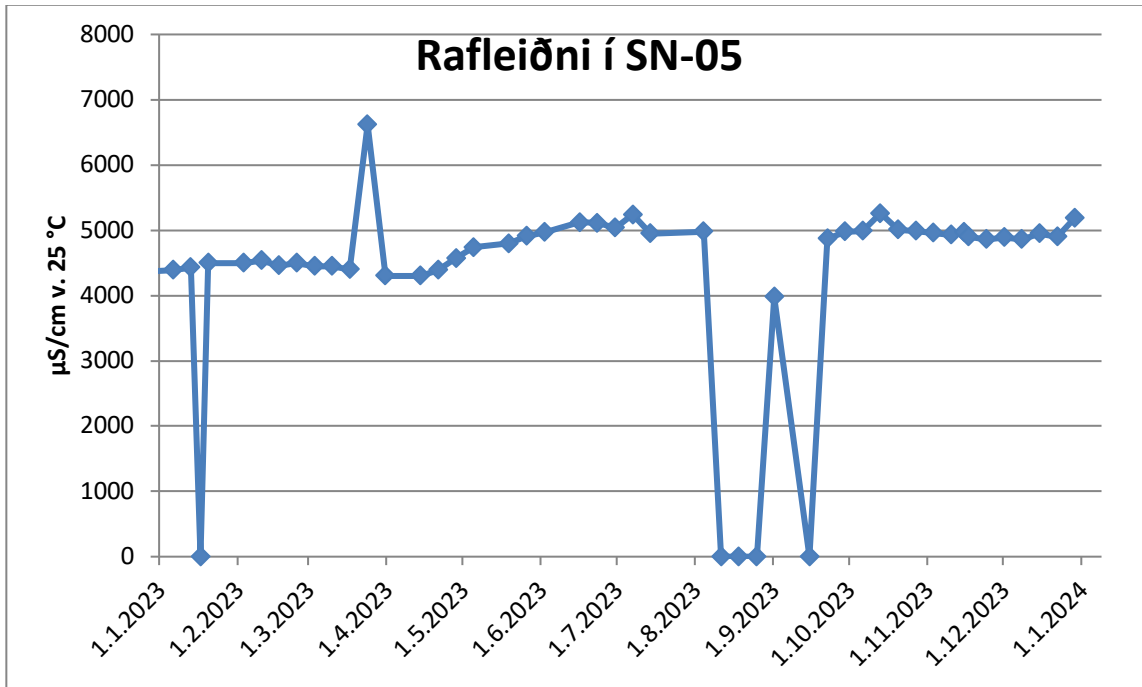
Dagsetning	Leiðni í $\mu\text{S}/\text{cm}$	Dagsetning	Leiðni í $\mu\text{S}/\text{cm}$	Dagsetning	Leiðni í $\mu\text{S}/\text{cm}$
06.01.23	7060	31.03.23	8780	20.10.23	8610
13.01.23	7470	28.04.23	8500	27.10.23	7100
20.01.23	7390	11.08.23	5680	03.11.23	7310
27.01.23	6850	18.08.23	7000	10.11.23	7720
03.02.23	7440	25.08.23	6840	15.11.23	7150
10.02.23	8290	01.09.23	6800	17.11.23	7360
17.02.23	7400	08.09.23	7280	24.11.23	6870
24.02.23	7160	15.09.02	7190	01.12.23	6850
03.03.23	6690	22.09.23	7400	08.12.23	6820
10.03.23	6920	29.09.23	7520	22.12.23	7040
17.03.23	7080	06.10.23	7180	29.12.23	7710
24.03.23	4480	13.10.23	7600		

Tafla 8. Mælingar á rafleiðni ($\mu\text{S}/\text{cm}$ við $25\text{ }^\circ\text{C}$) vatns úr holu SN-17 árið 2023.

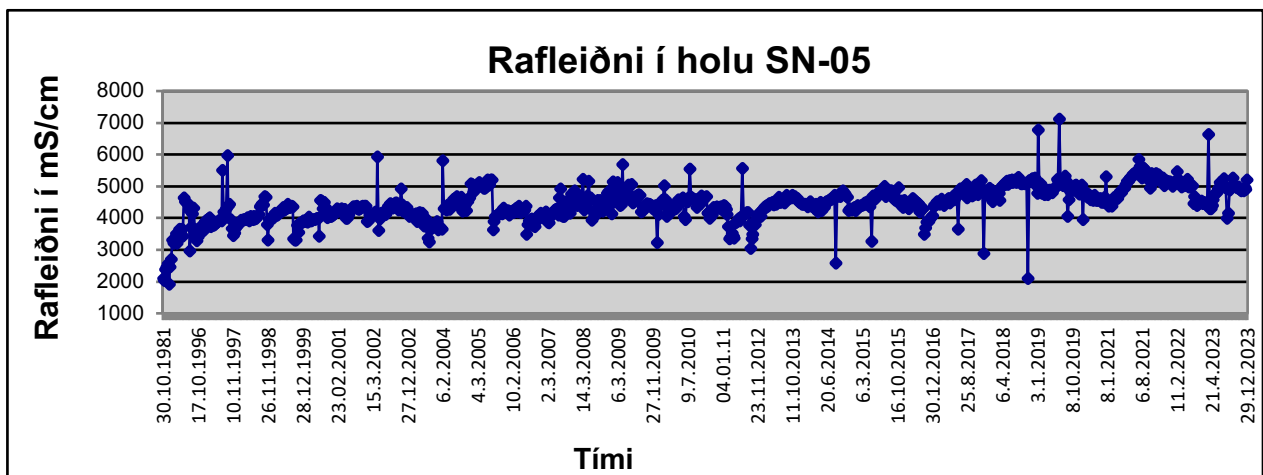
Dagsetning	Leiðni í μS	Dagsetning	Leiðni í μS	Dagsetning	Leiðni í μS
6.1.2023	6160	12.5.2023	6160	29.9.2023	5540
13.1.2023	6010	19.5.2023	6470	6.10.2023	5670
20.1.2023	5970	26.5.2023	6570	13.10.2023	5930
17.1.2023	6080	2.6.2023	6460	20.10.2023	6340
3.2.2023	5920	16.6.2023	6520	27.10.2023	6100
10.2.2023	5940	23.6.2023	6580	3.11.2023	5960
17.2.2023	5960	30.6.2023	6470	10.11.2023	5980
24.2.2023	5900	7.7.2023	6540	15.11.2023	6270
3.3.2023	6000	14.7.2023	6440	17.11.2023	6110
10.3.2023	5930	4.8.2023	6450	24.11.2023	6050
17.3.2023	5660	11.8.2023	6570	1.12.2023	6120
24.3.2023	5940	18.8.2023	5780	8.12.2023	6170
31.3.2023	5780	25.8.2023	5770	15.12.2023	6100
14.4.2023	5710	1.9.2023	5770	22.12.2023	6180
21.4.2023	6060	8.9.2023	5840	29.12.2023	6220
28.4.2023	5280	15.9.2023	5680		
5.5.2023	6180	22.9.2023	5620		

Rafleiðni í holu SN-17 (Tafla 8) er nálægt 6000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ að jafnaði en nokkru hærri yfir sumarmánuðina þegar vinnsla og hitastig var sem lægst. Rafleiðnin er að jafnaði nokkru hærri en í SN-05 en ívið lægra en í SN-06 og mun lægri en í SN-12.

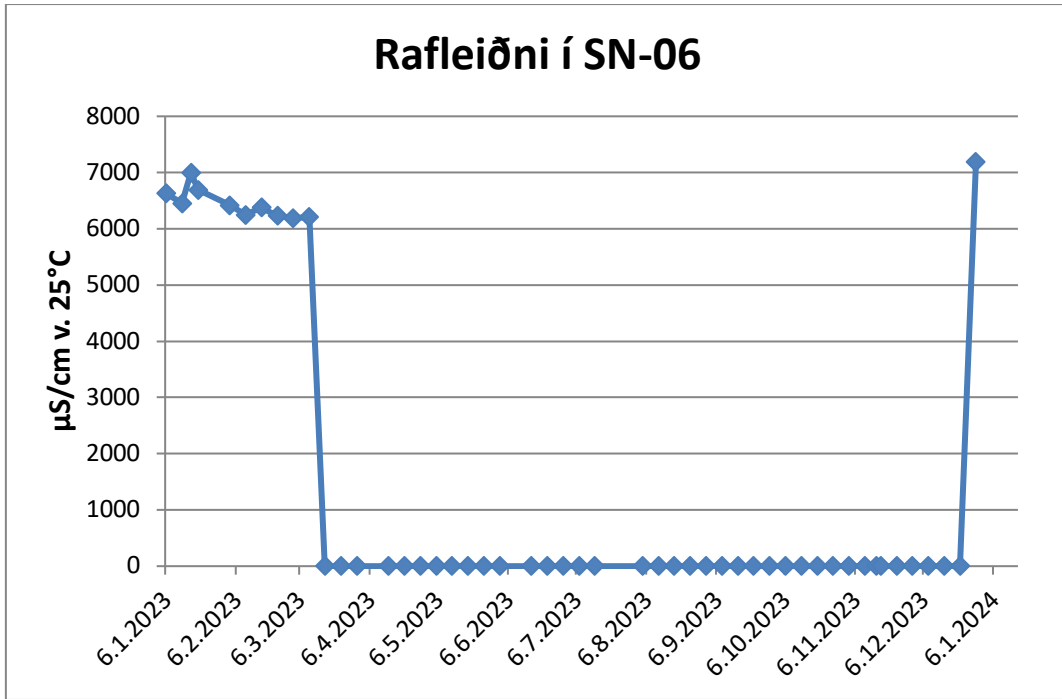
Rafleiðni í vinnsluvatns úr holunum virðist vera örlítið hækkandi milli ára, en mjög breytileg eftir vinnslu. Borun SN-17 hafði mikil áhrif á jarðhitakerfið og á efnasamsetningu vinnsluvatns.



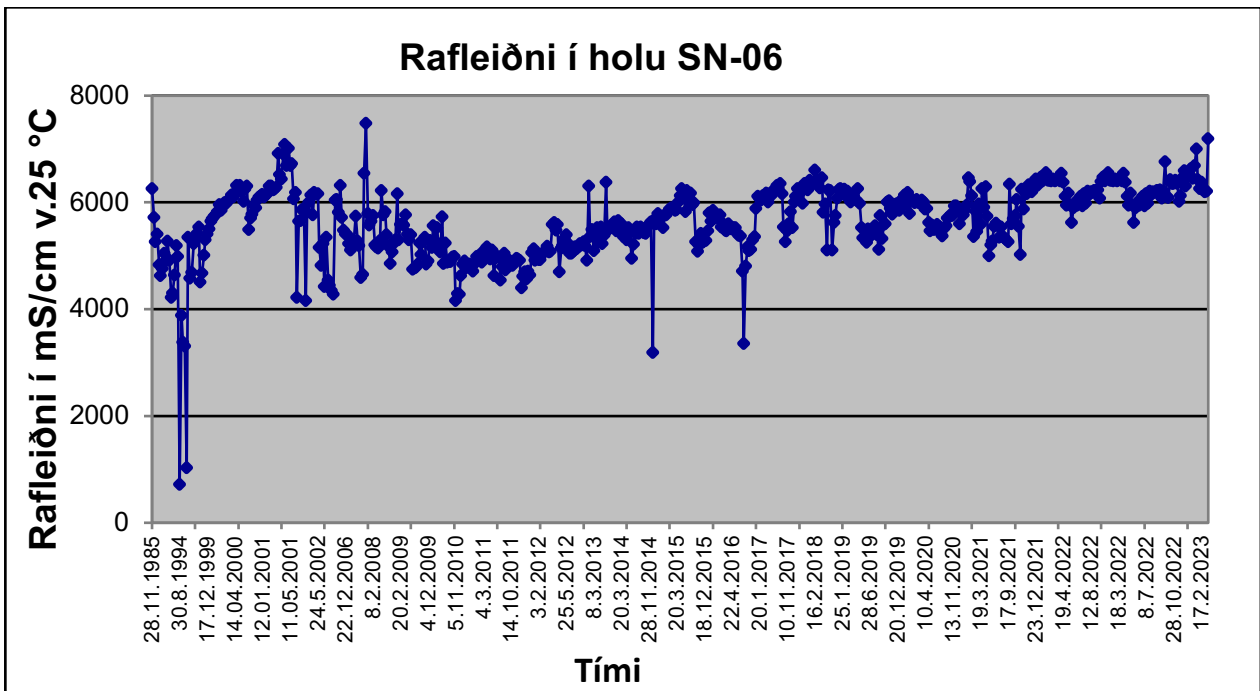
Mynd 1. Mælingar á rafleiðni í holu SN-05 á árinu 2023.



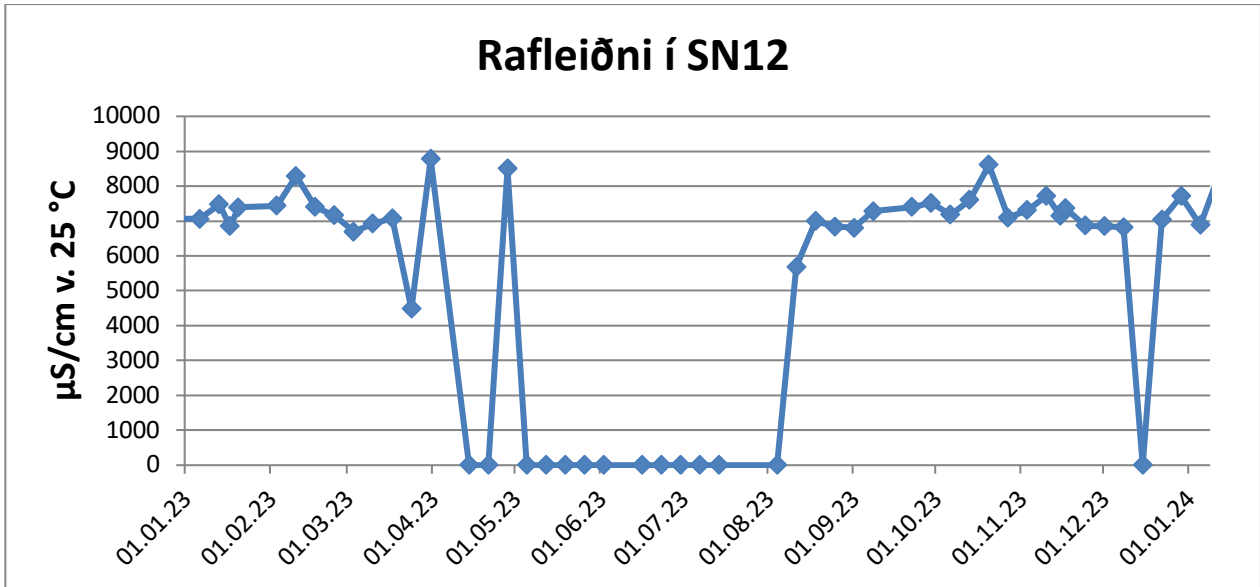
Mynd 2. Breytingar í rafleiðni með tíma, hola SN-05.



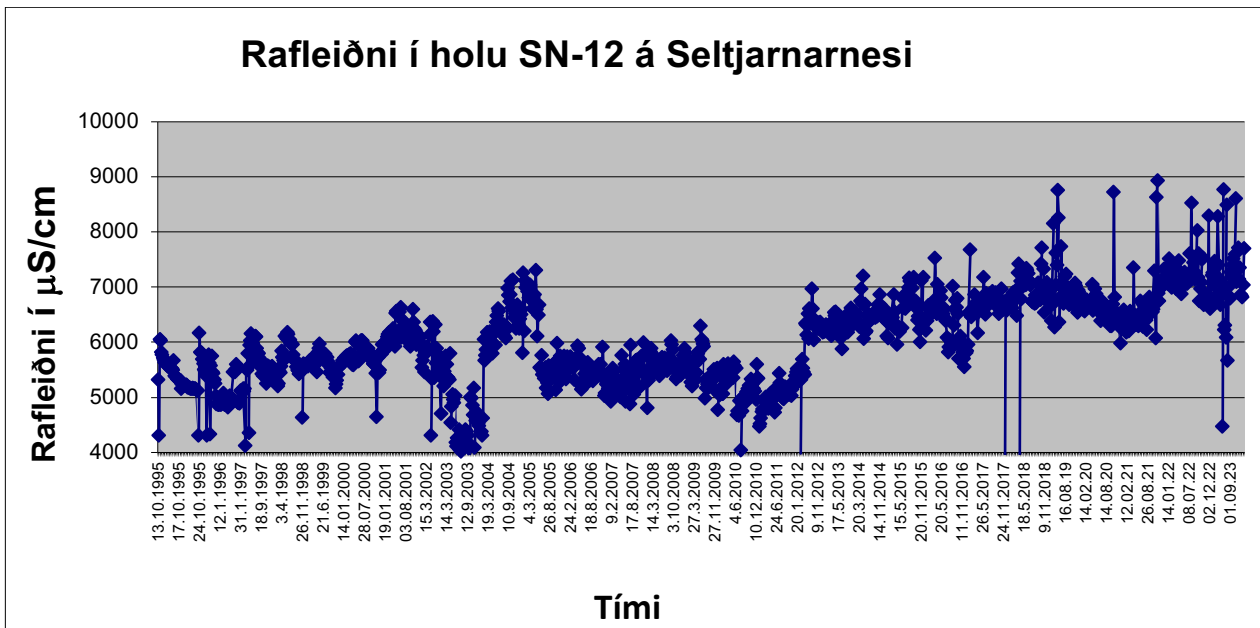
Mynd 3. Mælingar á rafleiðni í holu SN-06 á árinu 2023.



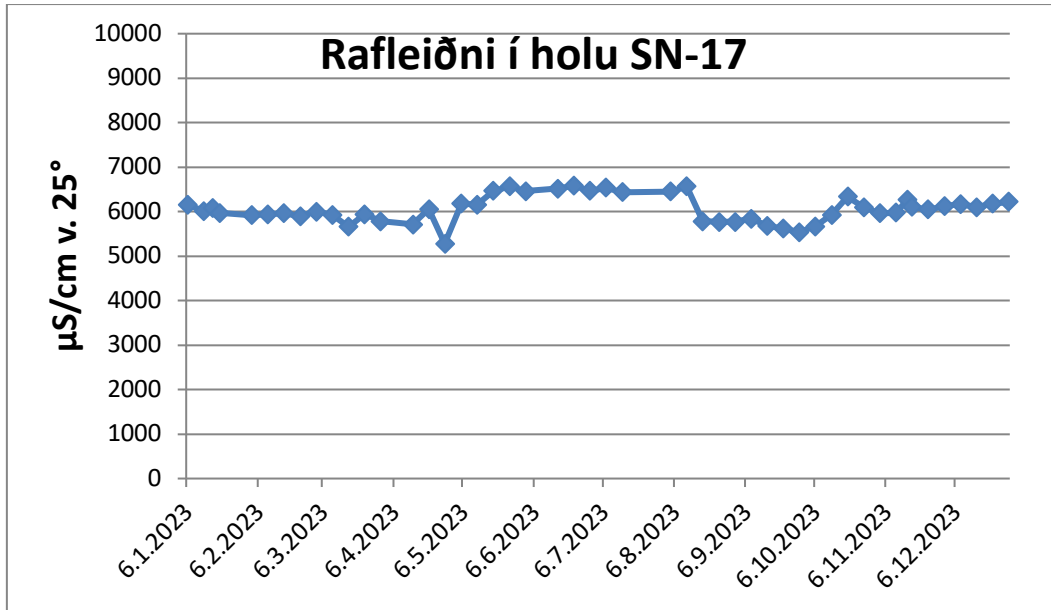
Mynd 4. Breytingar í rafleiðni með tíma, hola SN-06



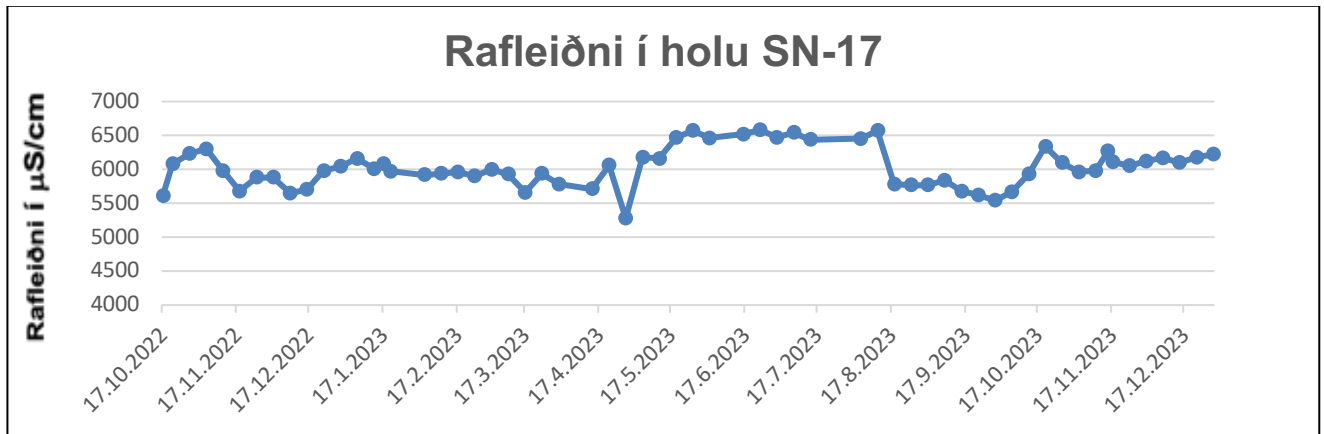
Mynd 5. Mælingar á rafleiðni í holu SN-12 á árinu 2023.



Mynd 6. Breytingar á rafleiðni með tíma, hola SN-12.



Mynd 7. Mælingar á rafleiðni í holu SN-17 á árinu 2023.



Mynd 8. Breytingar á rafleiðni með tíma, hola SN-17.

5. MAT Á ÚTFELLINGAHÆTTU

Jarðhitavatn á Íslandi er yfirleitt nákvæmlega mettað með tilliti til kalsíumkarbónat- (kalk) steindarinnar kalsíts, sem stjórnar að mestu virkni hlutaðeigandi efna (Ca og CO_{2tot}) í vatninu. Ástæða þess að jarðhitavatnið getur þó orðið yfirmettað af kalsíti og útfelling kalks orðið í kjölfarið er yfirleitt sú að vatnið sýður, afloftast eða misheitar og missaltar æðar blandast í borholum eða hitaveitukerfum. Eins og fram hefur komið í vinnslueftirlitsskýrslum fyrri ára um Hitaveitu Seltjarnarness hefur kalkyfírmettun í vinnsluvatni veitunnar stundum reiknaðist við eða yfir þeim mörkum, sem útfellingar hafa orðið við annars staðar og jafnvel nokkuð yfir þeim (Hrefna Kristmannsdóttir, 2009).

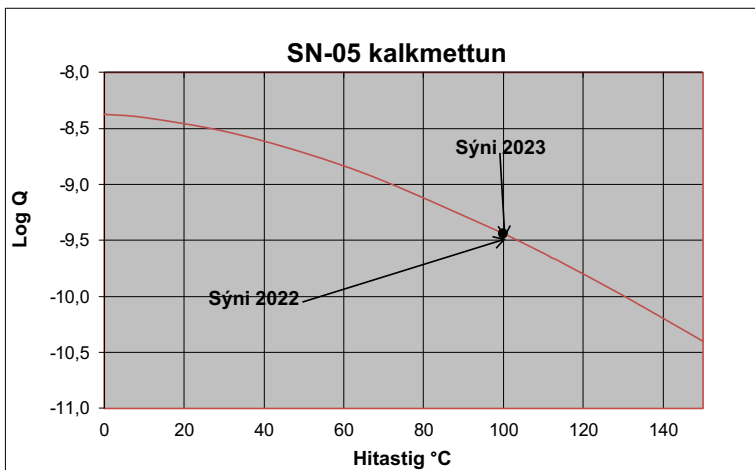
Ástæða yfirmettunar er einna helst talin stafa af blöndun misheitra og saltra æða í borholunum. Búnaður með prófunarplötum til að fylgjast með mögulegri kalkútfellingu er á öllum holutoppum vinnsluholna veitunnar. Á myndum 9, 10, og 11 er sýnd útreiknuð kalkmettunargráða fyrir sýni úr

holum SN-05, SN-12 og SN-17. Línan sýnir jafnvægisferil milli vatns og kalksteindarinnar kalsíts og punktarnir sýna jónamargfeldi fyrir kalsíum- og karbónatjónir í vatninu. Falli punktarnir á línuna er vatnið í jafnvægi, falli þeir neðan við hana er vatnið undirmettað af kalsíti og yfirmettað falli þeir yfir jafnvægislínunni.

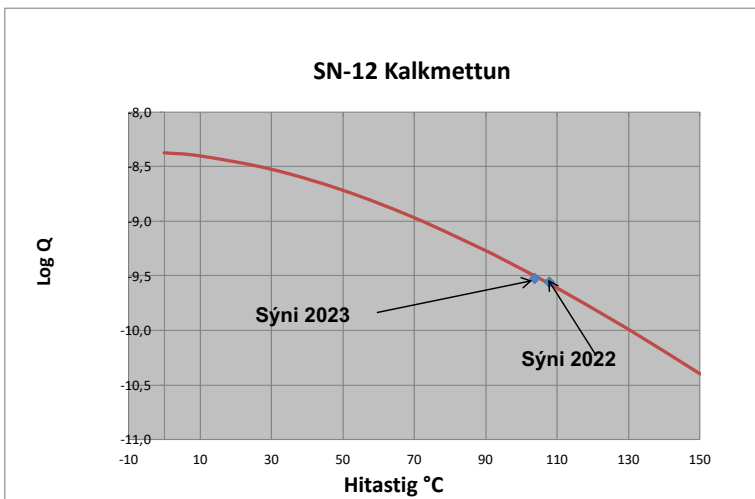
Á mynd 9 er sýnd útreiknuð kalkmettunargráða vinnsluvatns úr holu SN-05 á móti hitastigi í sýninu frá 2023 og í sýni frá 2022 til viðmiðunar. Sýnið frá 2023 er nákvæmlega mettað og því ekki útfellingahætta.

Á mynd 10 er sýnd kalsítmettun í holu SN-12 frá 2023 og 2022 og eru þau bæði nánast á jafnvægislínunni og ekki hætta á útfellingu.

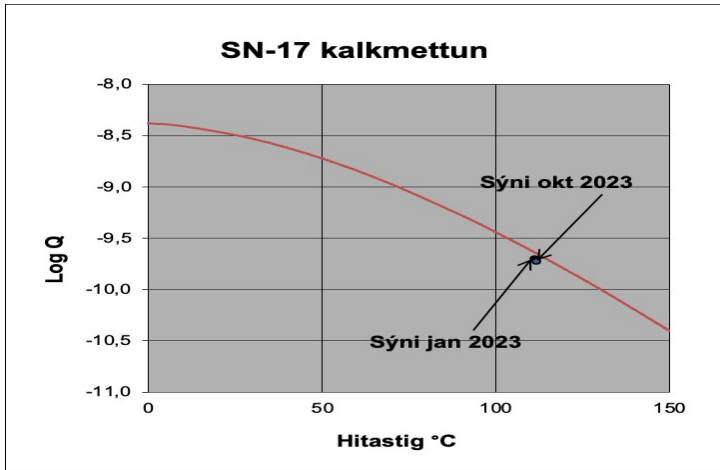
Á mynd 11 er sýnd kalsítmettun í tveimur sýnum sem tekin voru úr holu SN-17 á árinu 2023. Fyrri sýnið var tekið í janúar 2023 (merkt 2022) og það seinna 12. október. Bæði þessi sýni reiknast mjög nálægt mettun, en örlítið undirmettuð. Engin hætta er því á kalkútfellingum úr holunni.



Mynd 9. Kalsítmettun í holu SN-05 á móti mældum hita. Línan sýnir fræðilegt jafnvægi og punktarnir tilsvareandi jónamargfeldi vatnsins. Gildi fyrir sýnið frá 2023 er merkt á myndinni og fyrir sýni frá 2022 til samanburðar



Mynd 10. Kalsítmettun í holu SN-12 á móti mældum hita. Línan sýnir fræðilegt jafnvægi og punktarnir tilsvareandi jónamargfeldi vatnsins. Gildi fyrir eftirlitssýnið frá 2023 og sýnið frá 2022 eru sýnd á myndinni.



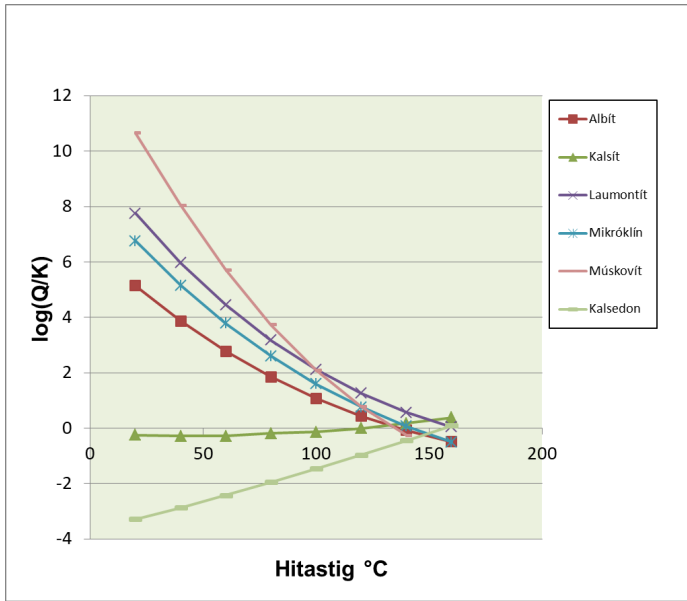
Mynd 11. Kalsítmettun í tveimur sýnum úr holu SN-17 frá árinu 2023 á móti mældum hita. Línan sýnir fræðilegt jafnvægi og punktarnir tilsvareandi jónamargfeldi vatnsins.

Þó sýni reiknist ekki verulega yfirmettuð þarf þó að fylgjast vel með útfellingaefirlitsbúnaði, sem er við alla holutoppa vinnsluholnanna. Lítið þarf út af að bera til að koma af stað útfellingu og getur hún orðið mjög hröð í svona söltu vatni. Æskilegt er að skoða prófunarplöturnar í búnaðinum á holutoppunum ekki sjaldnar en annan hvorn mánuð og fylgjast jafnframt vel með í dreifikerfinu. Hingað til hefur aldrei orðið vart við útfellingu á holutoppum, en fundist hefur nokkrum sinnum smávægileg útfelling í dreifikerfi, væntanlega vegna innrennslis af köldu vatni inn í það, mögulega um bilaða einstreymisloka (Hrefna Kristmannsdóttir, 2009).

Þótt til þess kæmi að kalkútfellingar yrðu í holunum eða í veitunni þá þyrfti það ekki að valda meiri háttar vandræðum ef vart yrði við þær nógu snemma og áður en kerfið færi að stíflast og valda rennslitruflunum. Ýmsar aðferðir eru þekktar til að tefja og hamla útfellingu, bæði efnafræðilegar og mekanískar. Í þessu samhengi má einnig benda á að Hitaveita Seltjarnarness hefur sett upp setgildir á nokkrum stöðum í dreifikerfinu, sem gefið hafa góða raun til að fella út “sandburð” í vatninu.

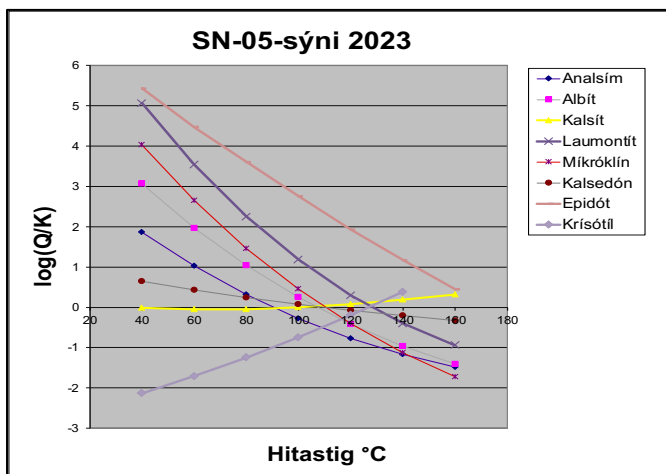
6. EFNAJAFNVÆGI Í JARÐHITAKERFINU

Eins og fram kom í kafla 2 hér að framan þá eru heildarefnagreiningarnar notaðar til að reikna út ýmis efnajafnvægi í vatninu miðað við ummyndunarsteindir í berginu. Gengið er þá út frá að efnasamsetningin mótist af síðasta efnajafnvægi vatnsins við bergið í jarðhitageymnum. Eins og fram hefur komið í kafla 2 í skýrslunni eru ummyndunarsteindir steindir sem verða til við niðurbrot bergsins vegna hvörfunar við heitt vatn í jarðhitakerfunum. Myndun þeirra og hvaða steindir myndast er verulega háð hitastigi. Samanburður á fræðilegu efnajafnvægi og reiknuðu efnajafnvægi í vatnssýnunum við mismunandi hitastig getur gefið mjög góðar vísbendingar um hitastig í jarðhitakerfum og hitastig í mismunandi vatnsæðum í þeim. Þó menn setji sig ekki inn í flókinn fræðilegan bakgrunn fyrir línuritunum þá endurspeglar þau sum vel þá blöndu vatns úr mismunandi æðum í holunum, sem fjallað hefur verið um í skýrslum um svæðið. Línuritinn sýna logaritmann af úttreiknuðu jónavirknimargfeldi við mismunandi hitastig fyrir vatnssýni úr holunum, tengd myndun ýmissa ummyndunarsteinda, sem taldar eru líklegar til að myndast í jarðhitakerfinu, á móti logaritmanum af tilsvareandi fræðilegum gildum. Mikilvægt er við gerð línuritanna að valdar séu ummyndunarsteindir sem líklegt er að myndist í jarðhitakerfinu á því hitabili sem ríkir í því. Núlllínan sýnir jafnvægisástand og við það hitastig sem línurnar skera hana er viðkomandi steind í jafnvægi ($\log Q/K=0$). Við það hitastig sem flestar línur skerast á núlllínunni má reikna með að vatnið hafi síðast verið í jafnvægi við berggrunninn.



Mynd 12. Útreiknað jafnvægi við ýmsar helstu ummyndunarsteindir á móti hita fyrir vatnssýni þar sem vatnskerfið er í jafnvægi við um 150 °C hita. Núlllínan sýnir jafnvægisástand við það hitastig sem línurnar skera hana og er viðkomandi steind þá í jafnvægi.

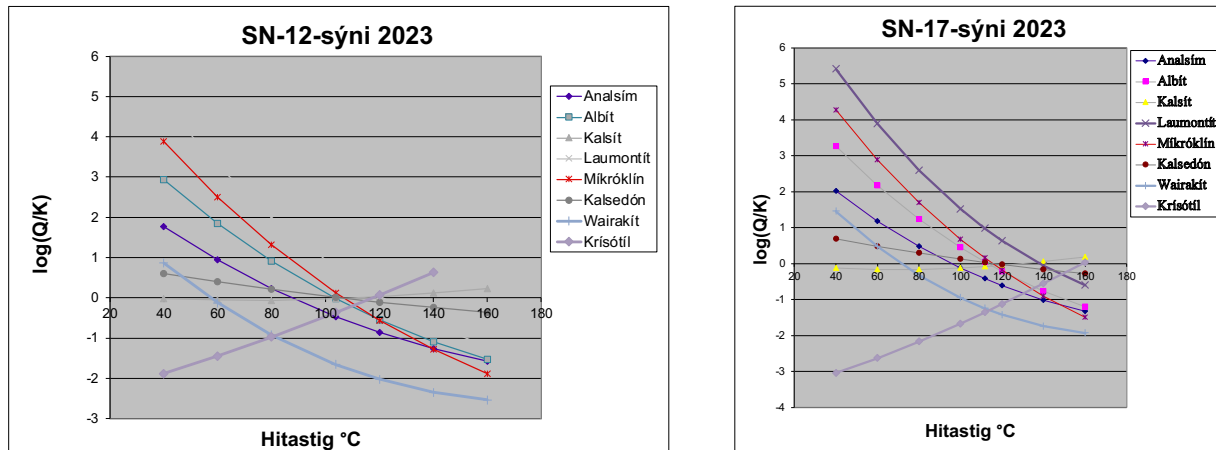
Á mynd 12 er sýnt slíkt línurit fyrir vatnssýni úr öðru vatnskerfi þar sem greinilegt jafnvægi er við hitastigið 150-160 °C. Þó ekki sé hægt að sjá svo greinilegan skurðpunkt gefa slík línurit oft góða vísbendingu um djúphitastig í jarðhitakerfinu. Séu margar misheitar vatnsæðar í borholu er líklegt að ekki komi fram neitt eitt jafnvægi, en línuritið getur engu að síður gefið vísbendingu um að vatnið sé upprunnið við blöndun misheitra vatnskerfa. Margar línur sem skerast undir núlllínunni geta einnig bent til blöndunar við heitara vatn.



Mynd 13. Útreiknað jafnvægi við ýmsar helstu ummyndunarsteindir á móti hita fyrir vatnssýni úr holu SN-05 árið 2023. Núlllínan sýnir jafnvægisástand við það hitastig sem línurnar skera hana og er viðkomandi steind þá í jafnvægi.

Á mynd 13 eru sýnt log Q/K línurit fyrir vatn úr vinnsluholu SN-05 frá sýnatöku 2023. Á línuritinu sést að vinnsluvatnið er ekki í jafnvægi við neitt eitt hitastig, en línur skerast við um 100-120 °C og má sjá blöndun bæði við kaldara og heitara vatn. Breytingar eru nokkrar á línuritunum úr holu SN-05 milli árána 2023 og 2023, enda var vinnslan talsvert frábrugðin þessi ár og mun meiri 2023. Á mynd 14 eru línurit fyrir vatnssýni úr holu SN-12 og holu SN-17 í tekin í október 2023. Línuritið úr holu SN-12 er mjög svipað og línurit fyrri ára. Línuritið fyrir SN-17 sýnir greinilegri merki um heitara vatn en 120 °C en SN-12. Þó sömu hitastig megi merkja á línuritungum fyrir vatn úr öllum holunum eru þau þó mismunandi. Greinilegri merki sjást um æð við 140 °C hitastig í holu SN-17

en SN-12. Línurit fyrir holur SN-12 og SN-17 sýna að þar er greinilega ekki mikil blöndun við kaldara vatn en 100 °C.



Mynd 14. Útreiknað jafnvægi við ýmsar helstu ummyndunarsteindir á móti hita fyrir vatnssýni úr holu SN-12 og úr holu SN-17, bæði tekin í október 2023. Núlllínan sýnir jafnvægisástand við það hitastig sem línurnar skera hana og er viðkomandi steind þá í jafnvægi.

7. VINNSLUGÖGN

Gögn um vatnsvinnslu Hitaveitu Seltjarnarness eru með svipuðu sniði og undanfarin ár (Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2023). Gagnaskráningakerfi veitunnar sendi mánaðarlega skýrslur með gögnum sem mæld voru með sjálfvirkum hætti.

Hrefna Kristmannsdóttir og Eric Myer fóru yfir þau, undirbjuggu úrvinnslu og reiknuðu út meðalgildi fyrir einstaka mánuði, sem og allt árið. Hitaveita Seltjarnarness afhenti gögn sem mæld voru handvirkt og sló Hrefna þau inn í gagnagrunn. Rennsli og hiti voru mæld sjálfvirkt á klukkutíma fresti í vinnsluholum. Líkt og áður reyndist eitthvað um eyður í gögnunum fyrir árið 2023, eða um 86 klukkustundir í heildina þegar gögnin vantar fyrir allar holurnar (tafla 9). Að auki var stór eyða í gögnunum fyrir holu SN-17 þar sem öll gögn vantaði frá 11. október út árið, eða um tæplega 82 daga.

Tafla 9. Eyður í sjálfvirkri rituðum gögnum árið 2023.

Hola	Frá	Til
Allar	31.3.2023 08:00	31.3.2023 13:00
	5.7.2023 17:00	6.7.2023 07:00
	1.8.2023 22:00	2.8.2023 07:00
	26.8.2023 18:00	28.8.2023 07:00
	19.10.2023 06:00	19.10.2023 07:00
	24.11.2023 08:00	24.11.2023 09:00
	24.11.2023 18:00	25.11.2023 13:00
SN-17	11.10.2023 10:00	1.1.2024 00:00

Vatnsborð hefur hingað til eingöngu verið handmælt en í september 2021 voru settir upp og tengdir síritandi þrýstinemar í holum SN-01, -02, -03 og -04. Handmælingar voru enn gerðar með vatnsborðsmæli fyrir athugunarholurnar SN-01, SN-02 og SN-03. Í vinnsluholunum SN-05, SN-12 og SN-17 var handmældur þrýstingur notaður til að áætla vatnsborð. Hitastig var handmælt í öllum vinnsluholum.

7.1 Vinnsla

Greining á flæðismælingum á seinni hluta ársins 2021 benti til þess að mælingar á heildarrennsli úr vinnsluholum væri vanmetið um 5,1 L/s að jafnaði. Við nánari skoðun kom í ljós að mælt rennsli úr holu SN-12 var vanmetið eftir að hún var endurræst þann 23. ágúst 2021 eftir síkkun dællunnar. Greining á rennsli mælingum árið 2023 sýnir að vandamálið var ennþá til staðar á fyrri hluta ársins (janúar – apríl), þar sem rennsli úr holu SN-12 var vanmetið um 3 L/s að jafnaði yfir tímabilið. Því var rennslið úr SN-12 leiðrétt sem þessu nam. En nýr mælir var settur á leiðslu frá holunni í byrjum maí 2023 og gert er ráð fyrir því að hann mæli rétt rennsli. Bilun varð í skráningarkerfi fyrir holu SN-17 þann 11. október 2023 og ekki tókst að laga hana fyrr en eftir áramót. Því þurfti að áætla rennsli úr þeirri holu frá 11. október og fram til lok ársins.

Vinnsla úr hverri holu fyrir sig er sýnd á myndum 15-18 en í töflu 10 sést hvenær dælt var úr holunum. Enn hefur ekki verið tekin ákvörðun um hvort hola SN-4 verði tengd aftur inn á kerfið eftir að dælustrengur slitnaði og dælan festist í henni vorið 2021. Hámarksafköst holunnar voru metin sem minni en 10 L/s (Vatnaskil, 2021) eftir það og með töluverðum niðurdrætti.

Tafla 10. *Keyrsla á djúpdælum Hitaveitu Seltjarnarness 2023.*

Hola	Frá	Til
SN-05	1.1.2023	11.8.2023
	30.8.2023	31.12.2023
SN-06	1.1.2023	5.4.2023
	29.12.2023	31.12.2023
SN-12	1.1.2023	4.4.2023
	5.4.2023	13.4.2023
	27.4.2023	10.5.2023
	11.8.2023	31.12.2023
SN-17	1.1.2023	31.12.2023

Hola SN-05 var hvíld stærstan hluta ársins 2022 en talsvert var unnið úr henni árið 2023 (meðalvinnslan var 15,9 L/s) samanborið við árið á undan (7,8 L/s). Á móti var hola SN-06 hvíld í tæplega 9 mánuði í fyrra og þar með minnkaði vinnslan úr henni um 73% frá 15,7 L/s árið 2022 í 4,2 L/s árið 2023. Vinnsla úr holu SN-12 var mjög lítil m.v. s.l. árin því holan var hvíld yfir sumarmánuðina. Meðalvinnslan úr henni lækkaði því úr 20,3 L/s árið 2022 í 8,1 L/s árið 2023 sem er 60% lækkun milli ára. Nýrri vinnsluholu, SN-17, var bætt inn í kerfið um miðjan október 2022 og var árið 2023 fyrsta heila ár hennar í rekstri. Dælt var úr holunni allt árið 2023 og var meðalvinnslan 24,2 L/s.

Heildarrennsli úr öllum vinnsluholum á Seltjarnarnesi er sýnt á mynd 19, og er hegðunin svipuð og undanfarin ár. Minnst er rennslið (klukkustundarmedaltöl) um sumarmánuðina (um 30 L/s) og mest á veturna (um 80 L/s). Mánaðarmedalvinnsla, ásamt ársmeðalvinnslu, frá 1994 til 2023 eru í töflu 11. Ársmeðalvinnsla árið 2023 (52,3 L/s) var um 9% hærri en árið á undan (48,0 L/s).

Heildarvinnsla úr jarðhitasvæðinu á Seltjarnarnesi frá 1996 til 2023 er sýnd á mynd 20. Á myndinni er sýnt klukkustundarmeðaltal, ásamt mánaðarmeðalvinnslu og ársmeðalvinnslu úr töflu 11. Vinnslan árið 2023 var með svipuðu sniði og undanfarin ár með tilliti til árstíðabundinna sveiflna.

Tafla 11. Mánaðarmeðaltal heildarrennslis áranna 1994 til 2023.

	Meðalrennsli [L/s]															
	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
Janúar	47,2	50,0	43,5	62,3	63,1	65,5	54,0	54,9	63,5	59,6	60,9	60,4	56,5	67,0	66,0	
Febrúar	29,1	50,0	42,6	65,3	62,8	66,5	58,6	55,3	69,6	62,9	59,0	57,6	53,7	65,7	66,2	
Mars	35,7	52,4	42,6	65,0	47,0	64,9	56,0	53,1	58,9	57,2	55,2	55,4	55,1	60,9	65,0	
Apríl	46,8	49,0	44,0	53,4	49,4	54,5	46,1	42,7	50,1	47,6	49,0	51,4	50,6	52,1	57,1	
Mai	49,2	41,0	44,5	39,9	40,4	43,9	34,4	34,5	41,0	41,8	41,4	41,1	39,2	44,0	44,8	
Júní	53,6	37,0	44,0	32,1	28,5	38,0	29,4	29,6	28,7	32,0	31,0	31,2	36,2	38,3	35,6	
Júlí	55,3	34,9	43,0	26,0	27,3	30,0	26,0	26,7	27,6	28,6	28,1	29,0	30,9	32,3	33,2	
Ágúst	44,3	28,4	37,8	27,2	28,5	29,6	29,4	25,6	28,3	26,9	27,2	30,3	29,7	34,2	33,5	
September	31,8	48,3	33,6	36,5	39,4	36,0	38,0	29,1	32,7	37,7	36,5	39,8	33,6	42,6	41,0	
Október	30,5	55,3	23,3	45,8	49,7	45,0	48,8	40,1	43,6	45,8	47,7	50,0	43,1	48,0	54,7	
Nóvember	45,9	47,3	56,5	49,1	56,1	52,7	54,8	55,5	46,2	52,5	55,7	57,2	59,1	56,5	61,1	
Desember	47,2	43,8	62,4	53,5	58,8	58,1	53,9	58,0	52,6	60,7	63,1	54,7	57,2	64,1	63,5	
Árið	43,1	44,8	43,2	46,3	45,9	48,7	44,1	42,1	45,2	46,1	46,2	46,5	45,4	50,5	51,8	
	Meðalrennsli [L/s]															
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
Janúar	58,8	61,3	61,0	65,2	62,3	60,9	67,7	71,1	63,2	69,4	76,7	77,1	74,0	66,5	73,7	
Febrúar	64,0	66,5	60,4	59,4	59,4	59,9	68,1	73,5	59,2	70,5	76,4	72,8	70,8	70,2	66,9	
Mars	61,4	57,4	62,7	57,3	57,8	58,3	63,3	61,0	58,6	61,6	70,1	72,1	65,5	61,0	67,0	
Apríl	51,4	57,4	51,8	46,6	53,6	47,7	55,9	51,5	54,7	52,2	56,9	61,5	59,2	49,0	52,8	
Mai	42,3	42,6	41,6	39,4	45,2	39,5	45,4	43,9	43,7	48,3	45,9	46,7	48,9	38,2	46,4	
Júní	31,8	30,6	33,6	26,3	36,8	32,9	38,0	35,9	37,8	42,8	39,2	39,3	43,2	31,8	38,7	
Júlí	28,2	26,3	30,2	23,1	32,4	31,1	31,3	30,7	33,8	38,5	34,3	33,8	37,3	29,2	31,3	
Ágúst	31,2	27,4	31,3	23,9	32,6	29,6	32,2	31,0	32,6	37,3	33,2	35,2	32,2	28,5	30,1	
September	38,2	33,2	31,8	36,0	40,1	35,0	36,5	38,3	37,5	44,5	38,6	45,8	37,8	35,7	39,6	
Október	45,6	40,4	45,0	48,1	47,3	45,1	44,3	45,3	45,1	54,8	50,0	52,6	47,9	46,5	52,5	
Nóvember	51,3	66,8	50,0	60,2	58,1	50,0	58,5	55,8	61,8	59,5	59,4	63,6	57,2	49,8	59,3	
Desember	63,2	63,7	66,9	62,7	66,0	66,4	70,4	57,8	67,7	72,5	71,9	64,2	61,2	70,1	70,4	
Árið	47,3	47,8	47,2	45,7	49,3	46,4	51,0	49,6	49,6	54,3	54,4	55,4	53,0	48,0	52,3	

7.2 Vatnshiti

Hitamælingar ársins (bæði síritaðar og stakar handmælingar) eru sýndar á myndum 21-24. Meðalhiti í holu SN-05 í ár var 99,2 °C sem er 1,3 °C hærra en árið á undan (97,8 °C). Í holu SN-06 reyndist meðalhiti 1,6 °C lægri (118,3 °C) en árið á undan (119,9 °C). Meðalhiti í SN-12 reyndist töluvert lægri (um 6 °C) en árið á undan vegna minni notkunar, eða 101,8 °C í rennsli. Meðalhiti vinnsluvatns úr holu SN-17 var tæplega 111 °C.

7.3 Vatnsborð

Vatnshæðarmælingar eru sýndar á myndum 25-32. Mikilvæg viðbót varð við eftirlitsgetuna árið 2021 þar sem síritandi vatnsborðsmælur voru settir upp í holum SN-01, -02, -03 og -04. Neminn í SN-03 er ónýtur og eru því engin gögn úr þeirri holu árið 2023. Síritaðar mælingar eru sýndar með rauðum lit á myndunum.

Vatnsborð í athugunarholunum SN-01, SN-02 og SN-03 sveiflast í takt við vinnsluna úr svæðinu. Vatnsborð í þeim hefur farið hækkandi undanfarin ár (2020-2022) samhliða minnkandi

heildarvinnslu úr svæðinu, en vatnsborð lækkaði lítillega árið 2023 vegna vinnsluaukningu úr svæðinu m.v. síðastliðið ár. Í holu SN-01 eru sumar handmælingar (hljóðhraðamælingar) ótrúverðugar (vegna vatnsleika við fódurrörsenda) þar sem þær sýna mjög háa vatnsstöðu, eða um og yfir -30 m y.s. Þær mælingar eru sýndar á mynd 25 sem punktar í stað línu.

Síritaðar þrýstingsmælingar vantar fyrir stærstu hluta ársins í holu SN-04, en þær mælingarnar sem til eru frá apríl og maí sýna að vatnsborð í holunni er ennþá hátt m.v. s.l. 20 ár vegna þess að ekki hefur verið dælt úr henni eftir að hún tjónaðist í mars 2021. Vatnsborð í holu SN-05 árið 2023 var nokkuð svipað og árin á undan, og sveiflast milli ca. -30 og -115 m y.s.

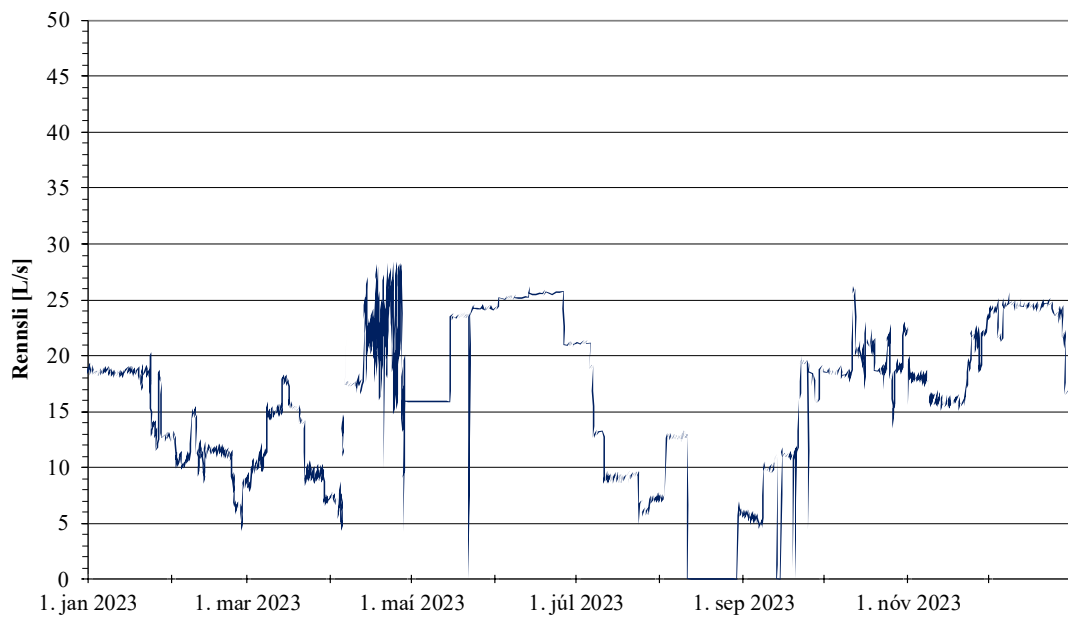
Engar mælingar voru gerðar í holu SN-06 árið 2023 líkt og árin á undan vegna bilunar í þrýstimælíbúnaði eins og áður fyrr. Nauðsynlegt er að gert sé við mælíbúnaðinn í henni sem fyrst svo hún geti fylgt sömu mælingaráætlun og hinar holurnar. Mjög óheppilegt er að geta ekki fylgst með viðbragði vatnsborðs í holunni.

Vatnsborð í holu SN-12 náði sögulegu lágmarki um miðjan desember 2022 (um -123 m y.s.) en hækkaði aftur árið 2023 vegna minni vinnslu úr henni. Vatnsborð í holu SN-17 hækkaði milli árána 2022 og 2023. Lægsta staða vatnsborðs undir lok árs 2022 var um -115 m y.s. en lægsta staða í lok árs 2023 var um -95 m y.s. Mælingar benda til að sérstaklega góð tengsl séu á milli SN-12 og SN-17 og er því nauðsynlegt að skoða hvernig þær geti sem best verið nýttar samtímis.

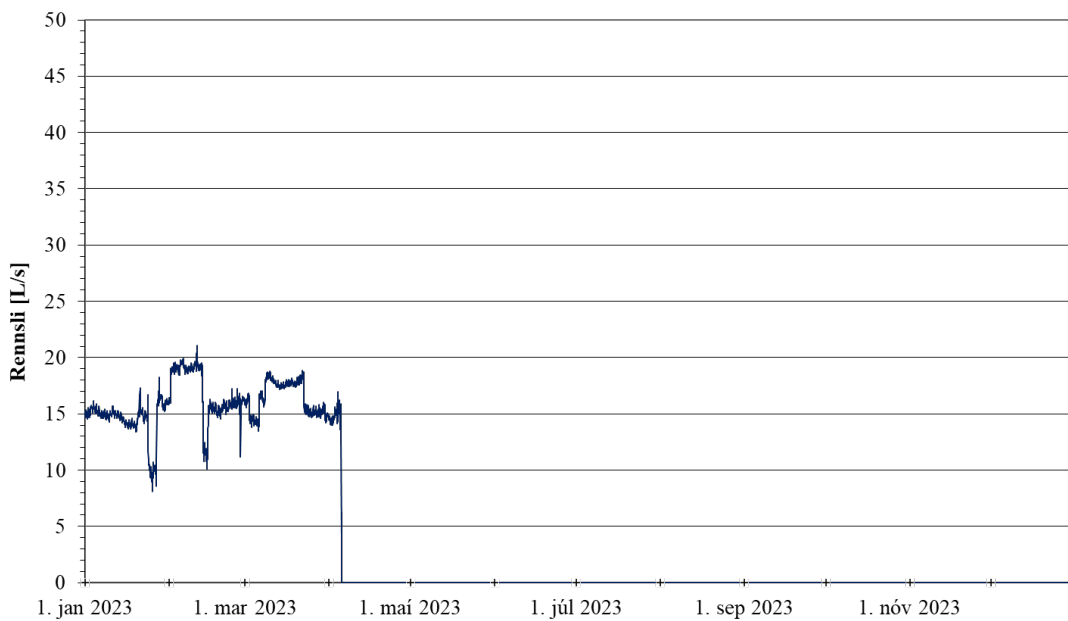
Mælingarnar á vatnsborði og hita benda til þess að jarðhitakerfið sé í ásættanlegu ástandi undir lok árs 2023 og að notkun nýrrar holu, SN-17, gangi vel. Ákvörðun hefur ekki verið tekin um hvort eldri holunni, SN-04, verði bætt aftur inn í kerfið þar sem hún er með töluvert skert afköst og þess vegna lægra vinnsluhitastig en áður fyrr. Áfram er mikilvægt að fylgjast vel með mælingum árið 2024 til að meta hvort vinnsla úr SN-17 valdi einhverjum ófyrirséðum breytingum á kerfinu, t.d. á magni og hitastigi á vatni úr öðrum vinnsluholum.

Eins og bent hefur verið á í fyrri skýrslum myndi sjálfvirkur útsláttarbúnaður tengdur vatnsborði í vinnsluholunum auka á öryggi og koma í veg fyrir skemmdir á dælum ef skyndileg lækkun yrði á vatnsborði. Slíkur búnaður var settur upp í holu SN-06 fyrir nokkrum árum, en er enn óvirkur. Eindregið er lagt til að hann verði lagfærður á sama tíma og mælíbúnaðurinn fyrir niðurdráttarmælingar. Jafnframt yrði settur upp samskonar búnaður í hinum vinnsluholunum. Reynsla undanfarna ára hefur sýnt að kólnun eða hitnun jarðhitavats vegna þátta tengdum rekstri kerfisins, t.d. förgun umframvats eða niðurrennsli, getur haft töluverð áhrif á vatnsborðið.

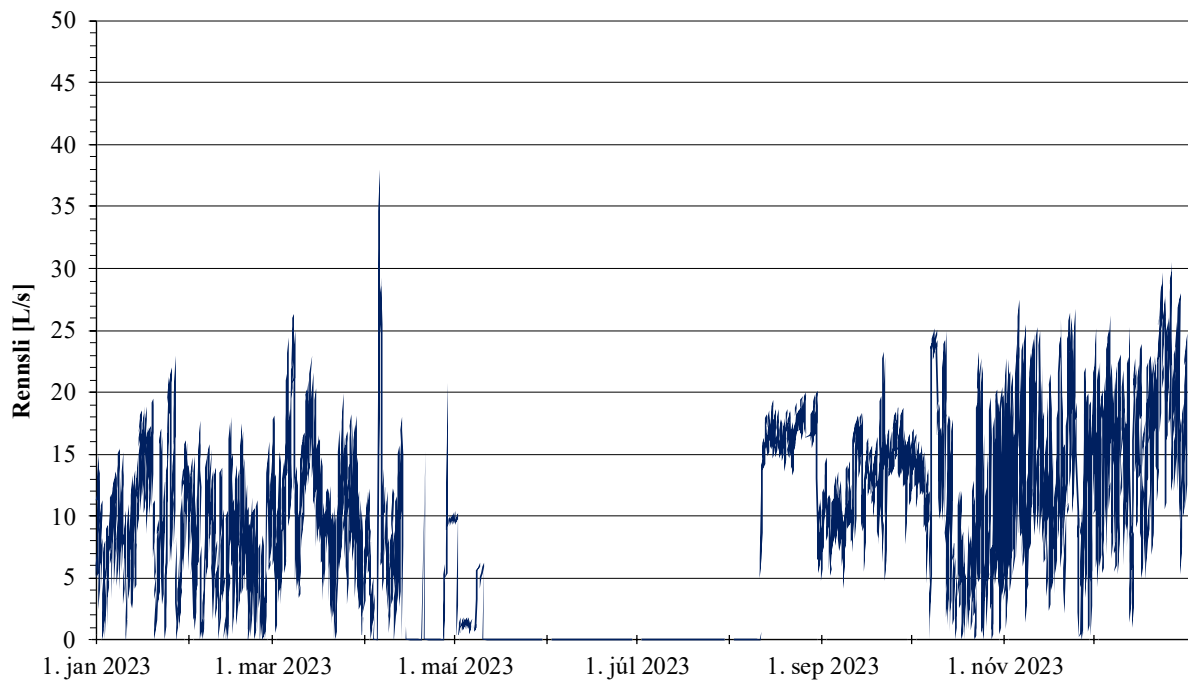
Forðafræðilíkan Vatnaskila af jarðhitasvæðinu á Seltjarnarnesi var síðast uppfært árið 2015 og var á sama tíma beitt til að meta framtíðarviðbrögð jarðhitakerfisins við aukinni heitavatsvinnslu (Vatnaskil, 2016). Líkaninu var beitt árið 2021 við rekstrarmat fyrir hitaveituna á komandi vetri 2021-22, eftir að hola SN-04 laskaðist, þar sem einungis var notast við holur SN-05, 06 og 12 við vetrarvinnsluna. Nú er komin upp breytt staða á kerfinu þar sem framtíðarnotkun á SN-04 er óráðin og SN-17 er komin inn. Því er ráðlegt að huga að nýtingu forðafræðilíkansins við skipulag nýs rekstrarfyrirkomulags og langtímaspá um nýtingu jarðhitakerfisins. Hægt er að beita líkaninu til að spá fyrir um hugsanlegar breytingar á kerfinu vegna breyttrar og aukinnar heildarvinnslu úr svæðinu samhliða áætlunum um aukna byggð á Nesinu. Einnig er hægt að nýta líkanið til að meta ýmsar breytingar á útfærslu og samsetningu vinnsluholna við hugsanlega bestun á rekstrarfyrirkomulagi veitunnar.



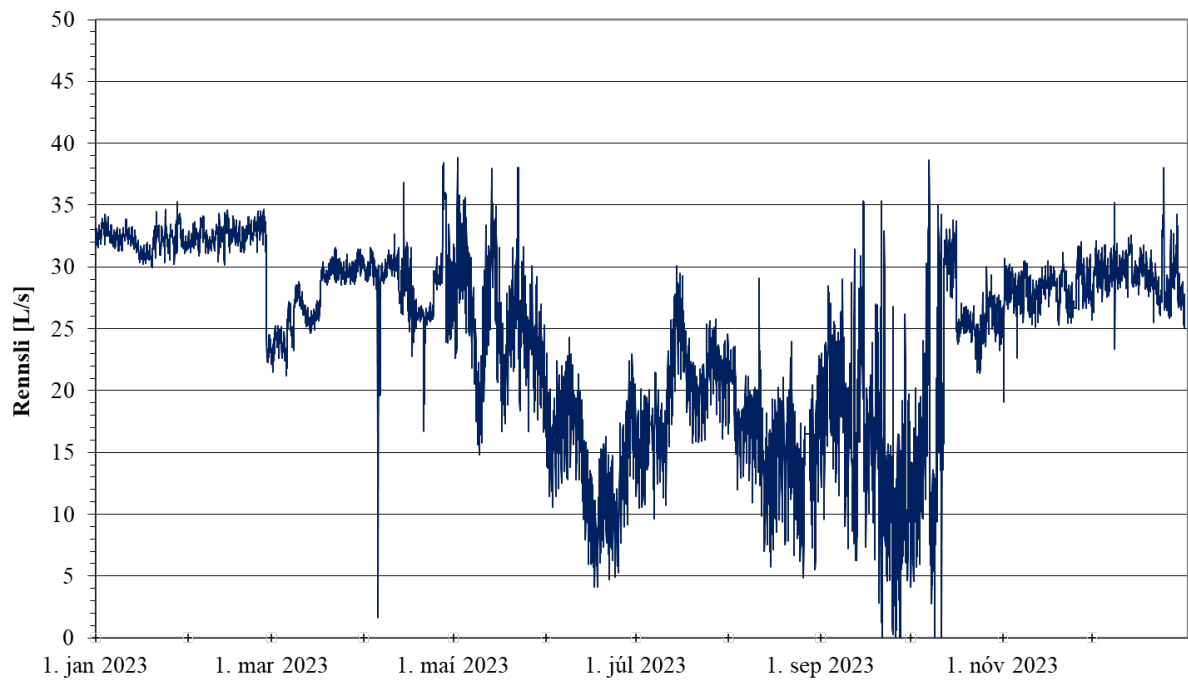
Mynd 15. Rennslí úr holu SN-05.



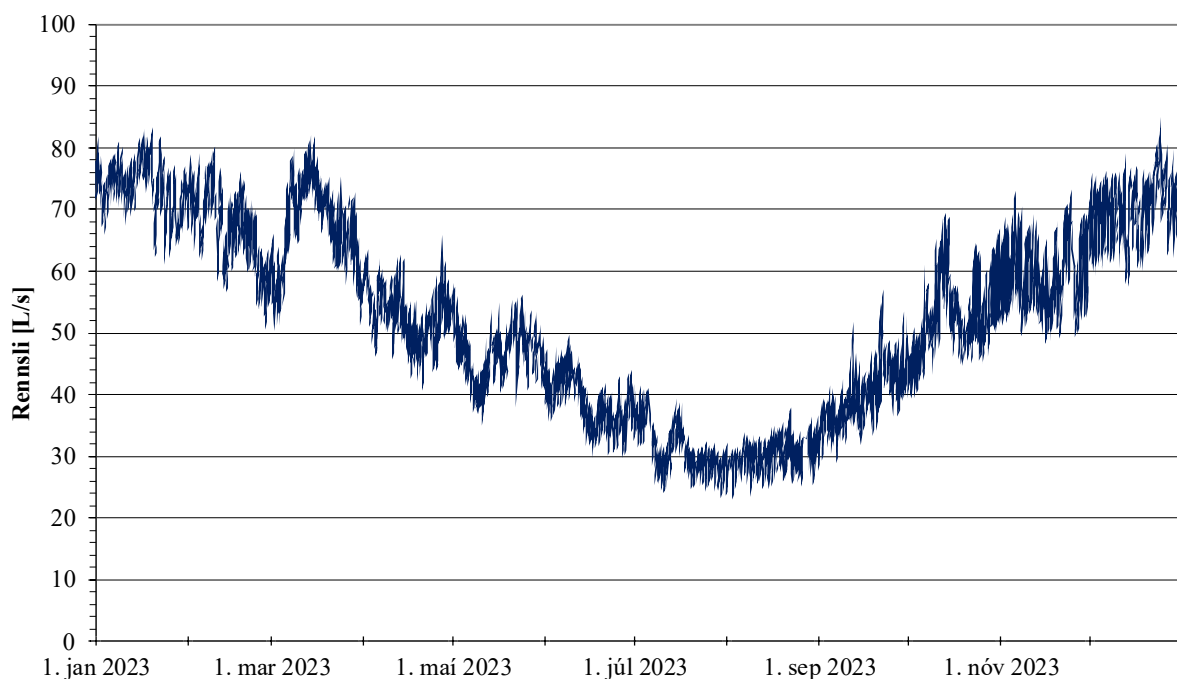
Mynd 16. Rennslí úr holu SN-06.



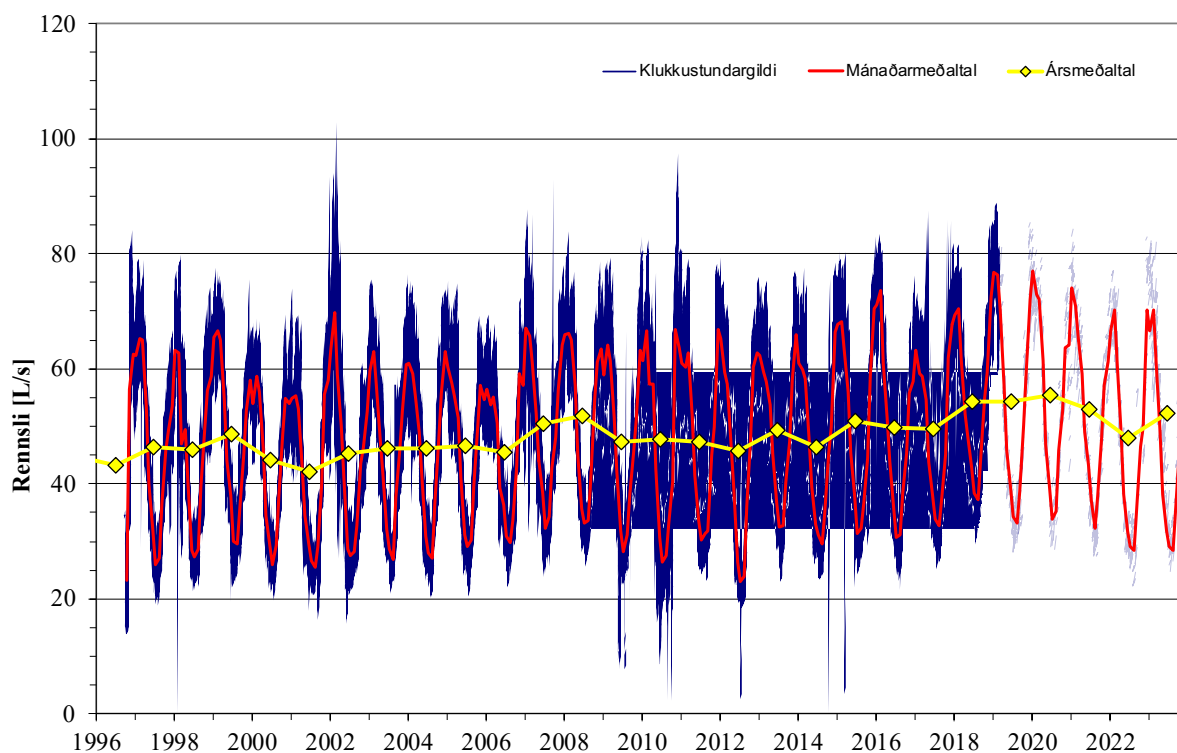
Mynd 17. Rennsli úr holu SN-12.



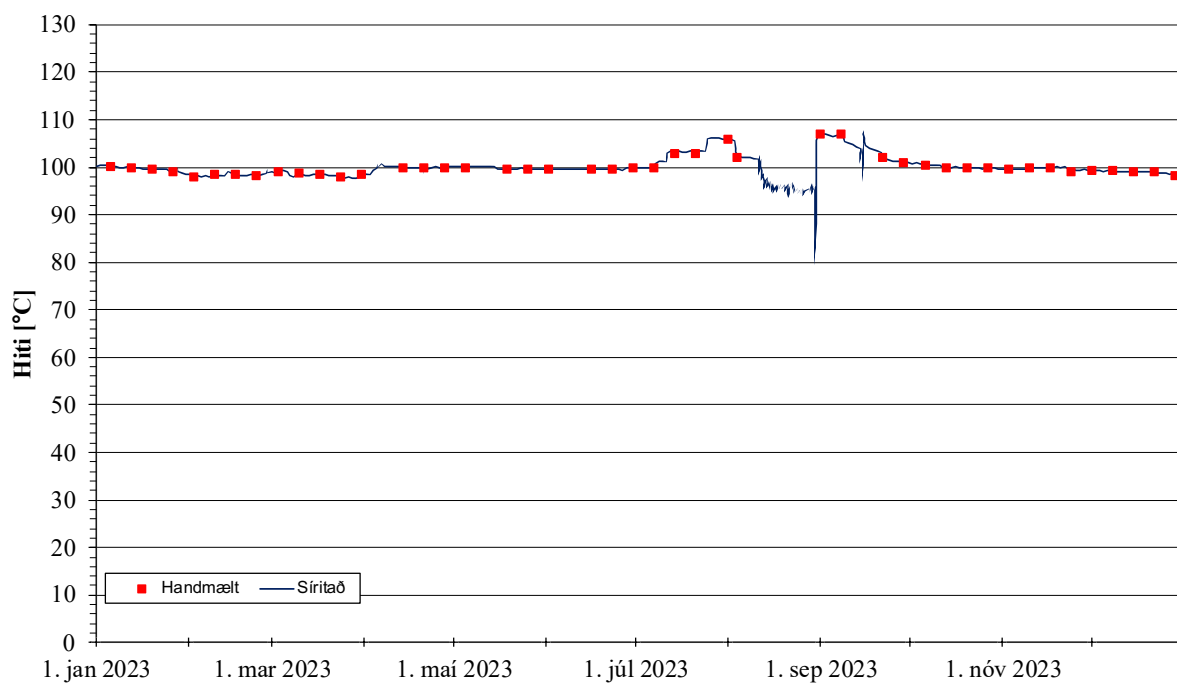
Mynd 18. Rennsli úr holu SN-17.



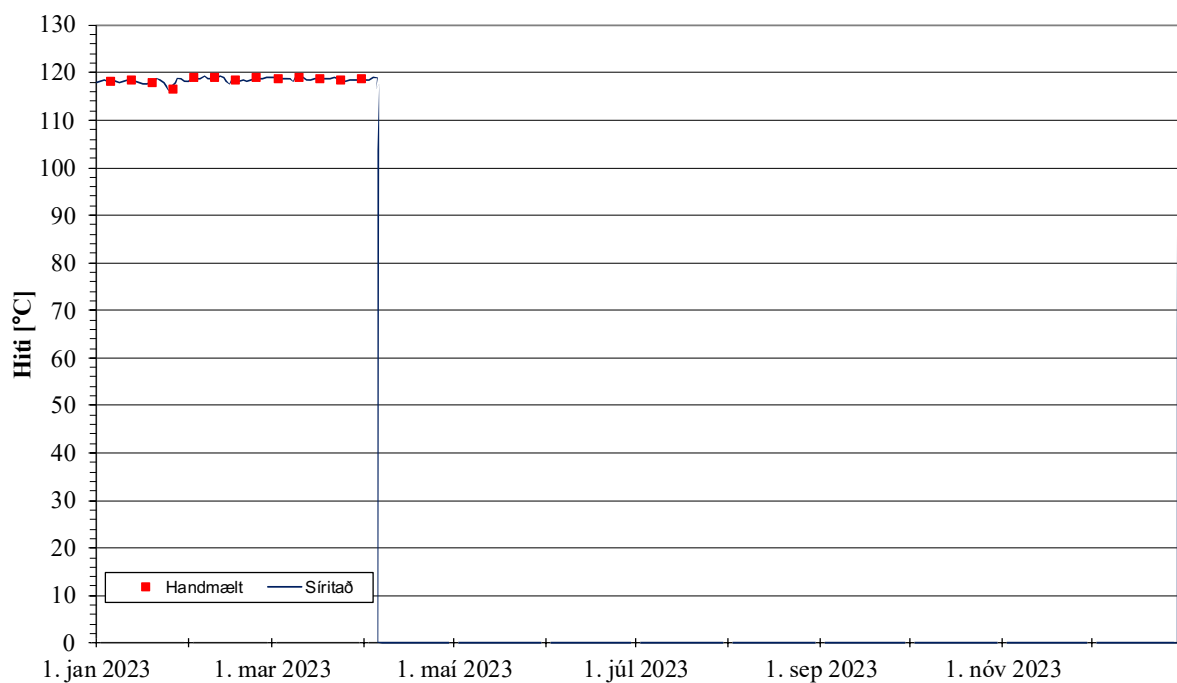
Mynd 19. Heildarrennsli úr öllum vinnsluholum á Seltjarnarnesi.



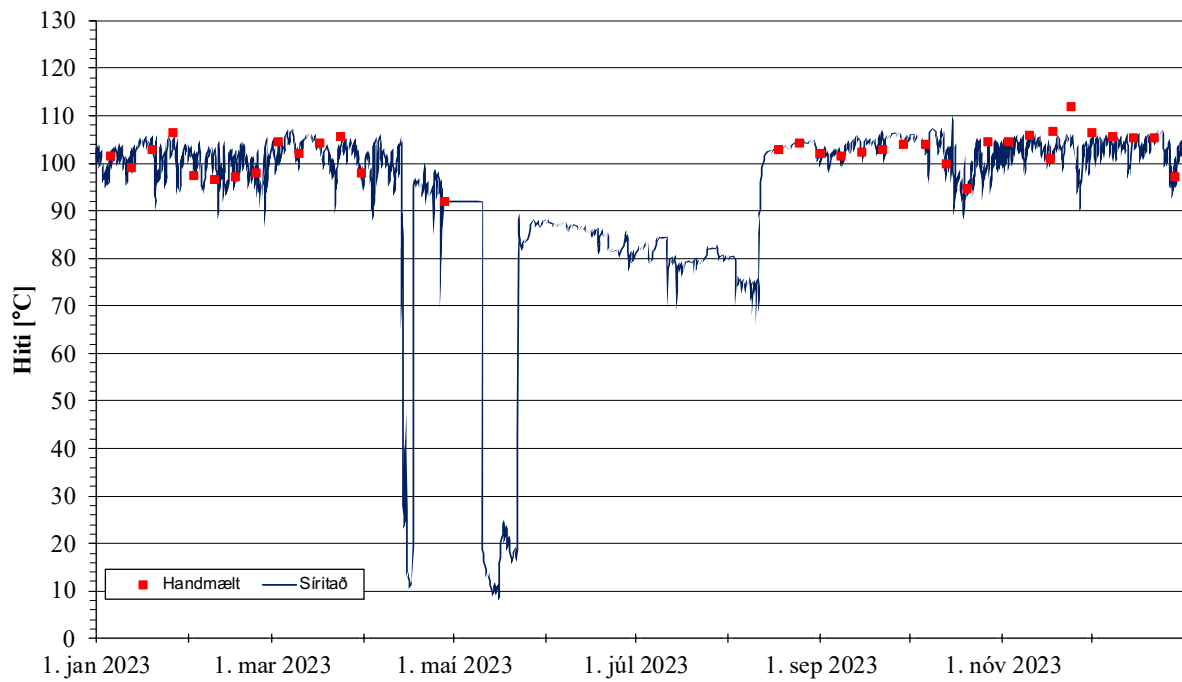
Mynd 20. Heildarrennsli úr vinnsluholum á Seltjarnarnesi 1996-2023. Sýnt er klukkustundargildi, mánaðarmeðalrennsli og ársmeðalrennsli.



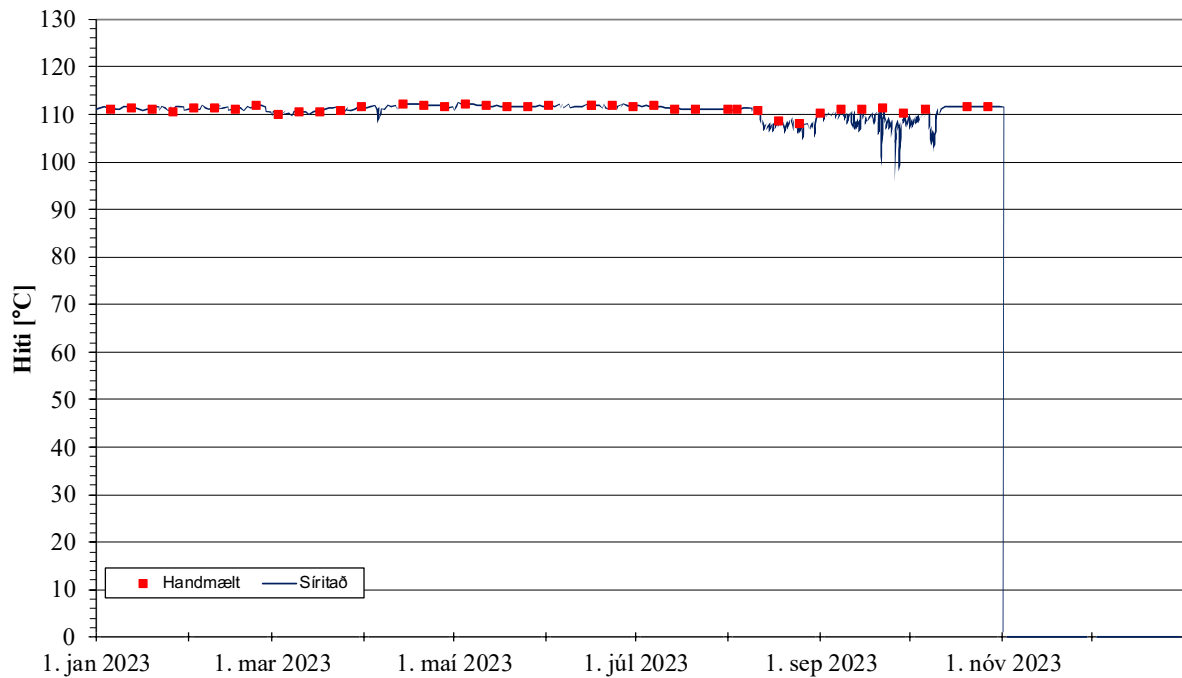
Mynd 21. Hitastig í holu SN-05.



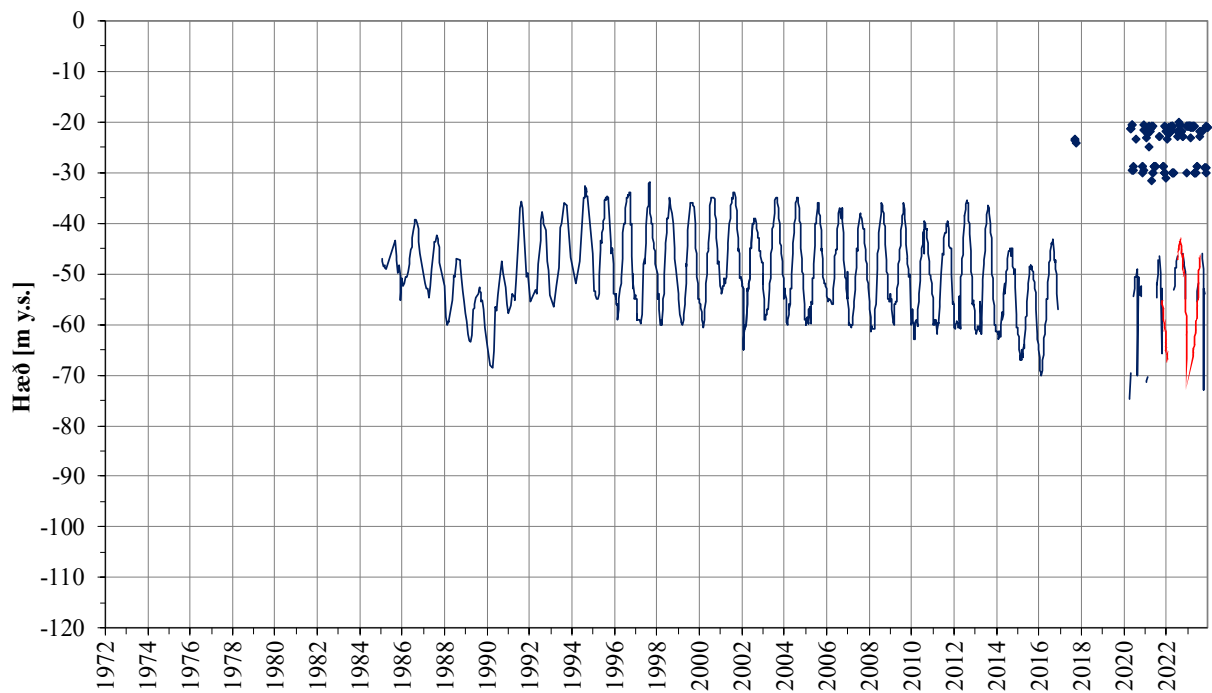
Mynd 22. Hitastig í holu SN-06.



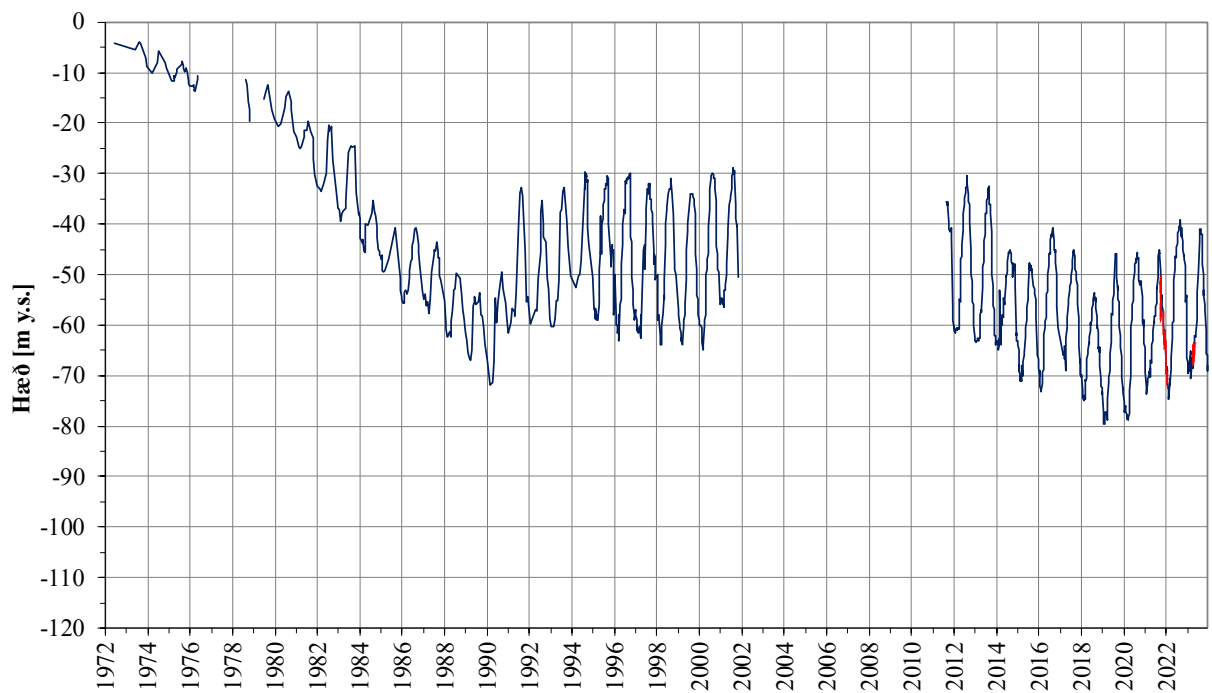
Mynd 23. Hitastig í holu SN-12.



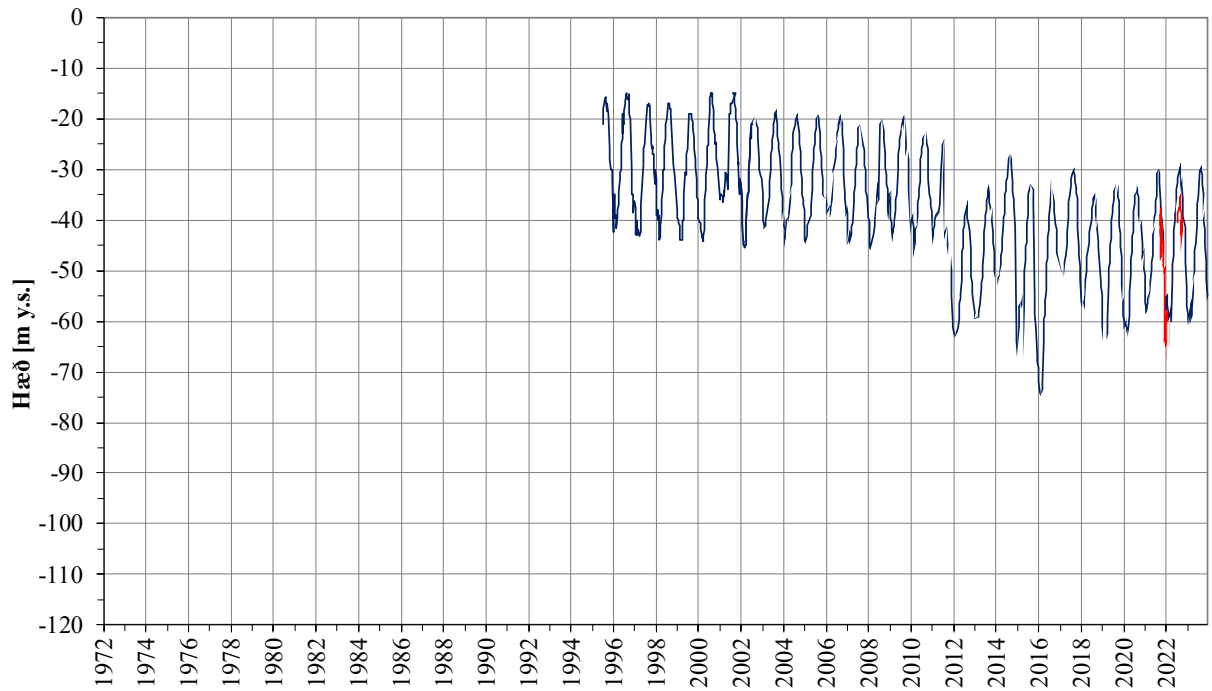
Mynd 24. Hitastig í holu SN-17.



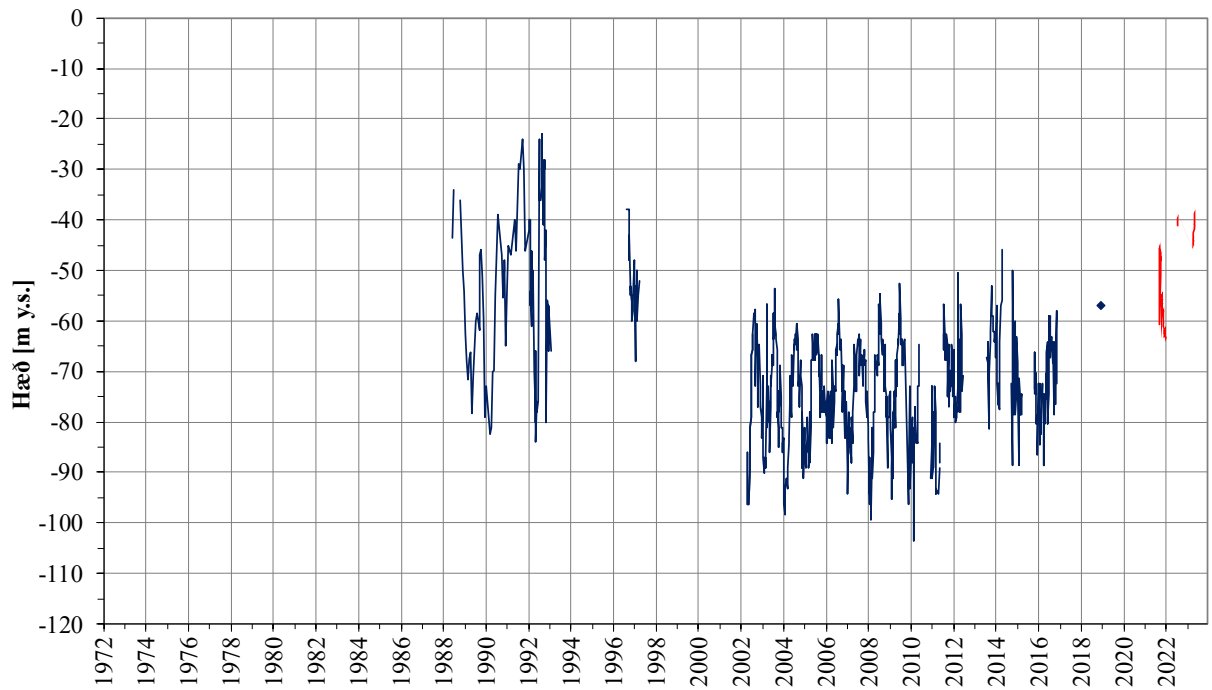
Mynd 25. Mælt vatnsborð í holu SN-01 frá 1972-2023. Handmælingar eru bláar og síritaðar mælingar rauðar. Bláu punktarnir eru mælingar frá hljóðhraðamæli sem eru ekki marktækar.



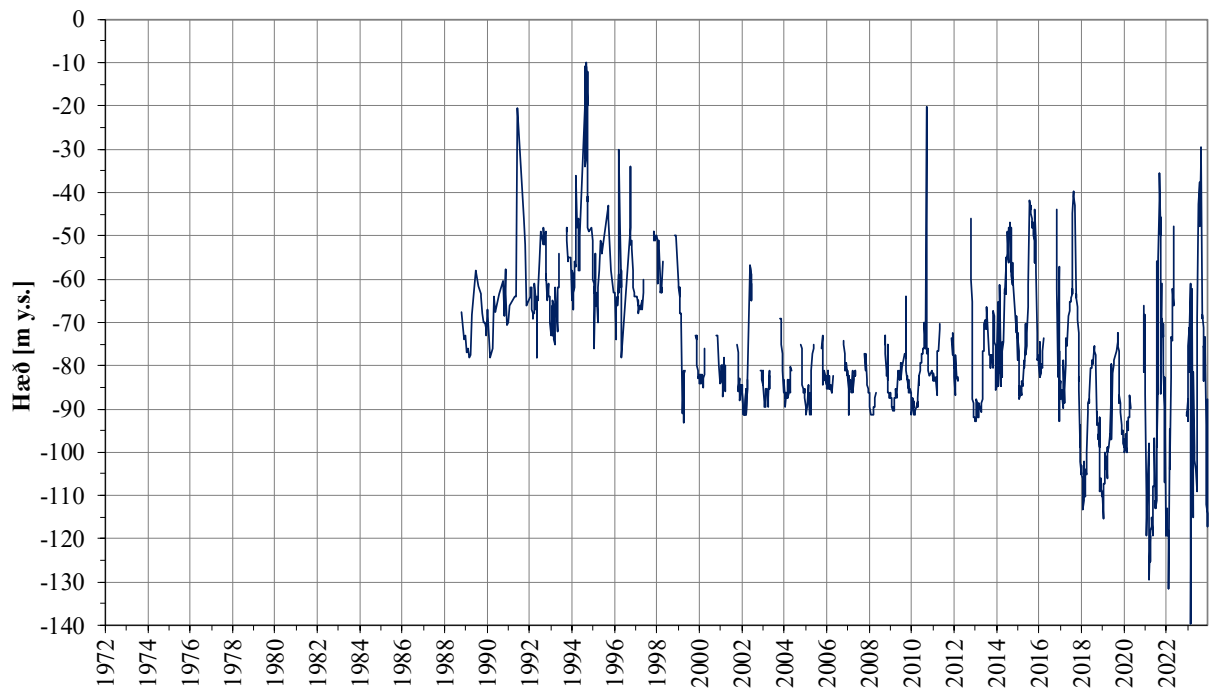
Mynd 26. Mælt vatnsborð í holu SN-02 frá 1972-2023. Handmælingar eru bláar og síritaðar mælingar rauðar.



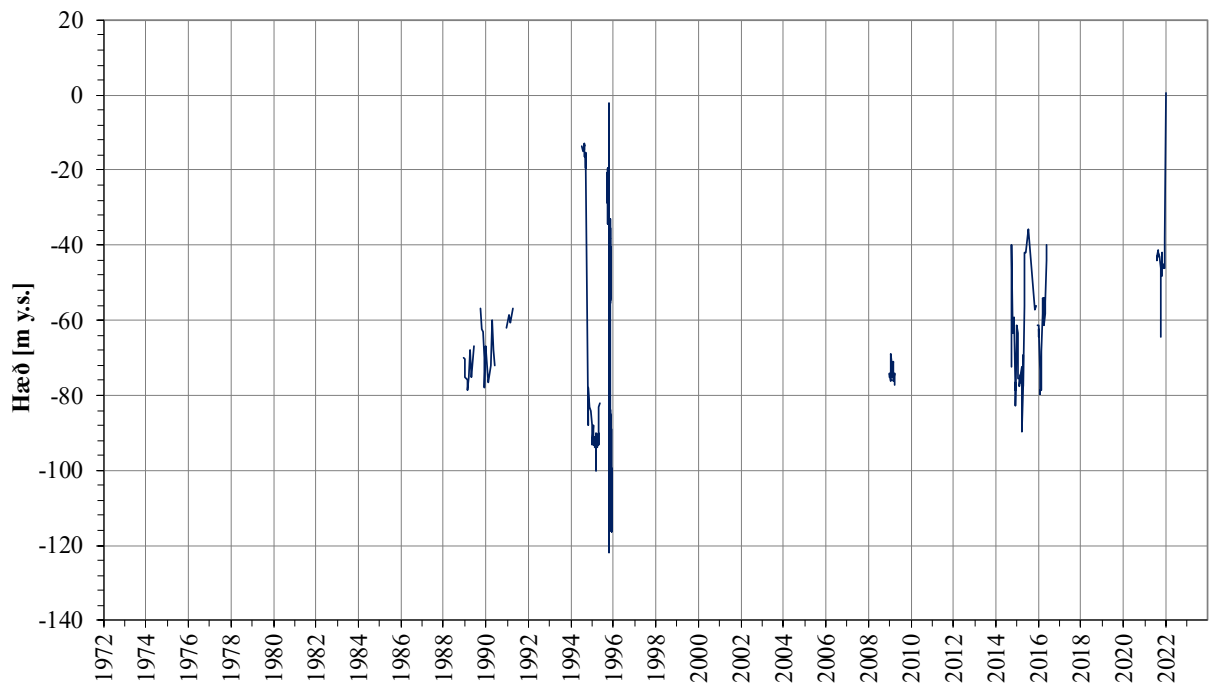
Mynd 27. Mælt vatnsborð í holu SN-03 frá 1972-2023. Handmælingar eru bláar og síritaðar mælingar rauðar.



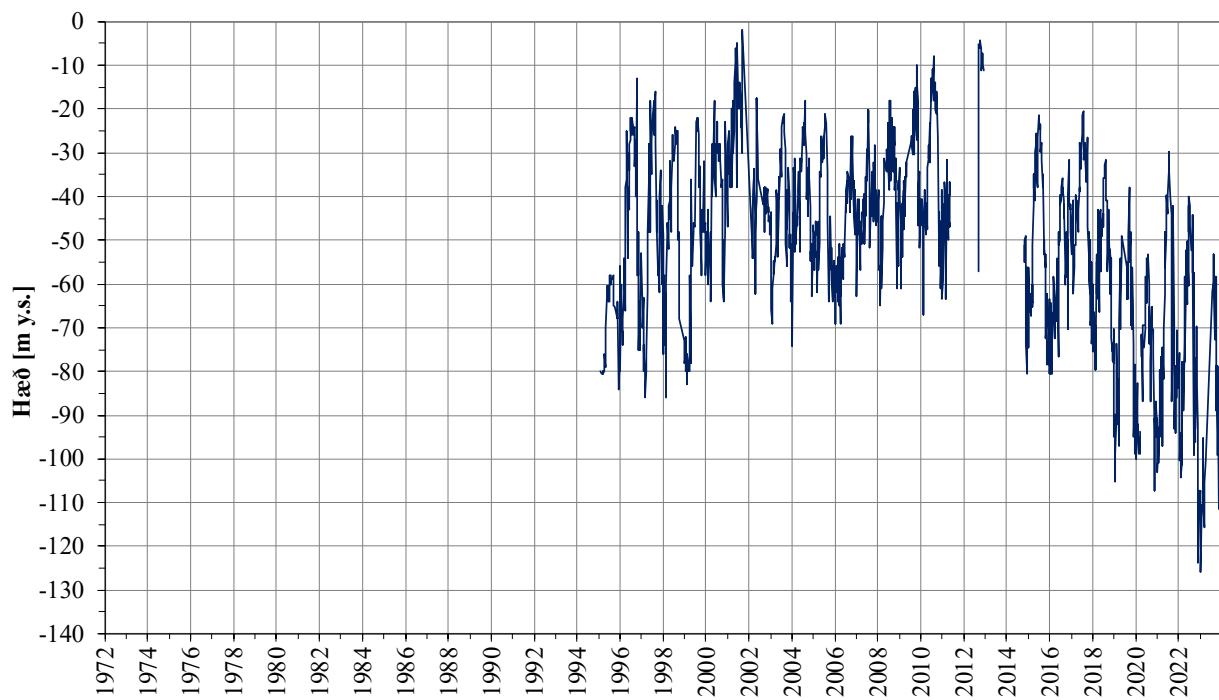
Mynd 28. Mælt vatnsborð í holu SN-04 frá 1972-2023. Handmælingar eru bláar og síritaðar mælingar rauðar.



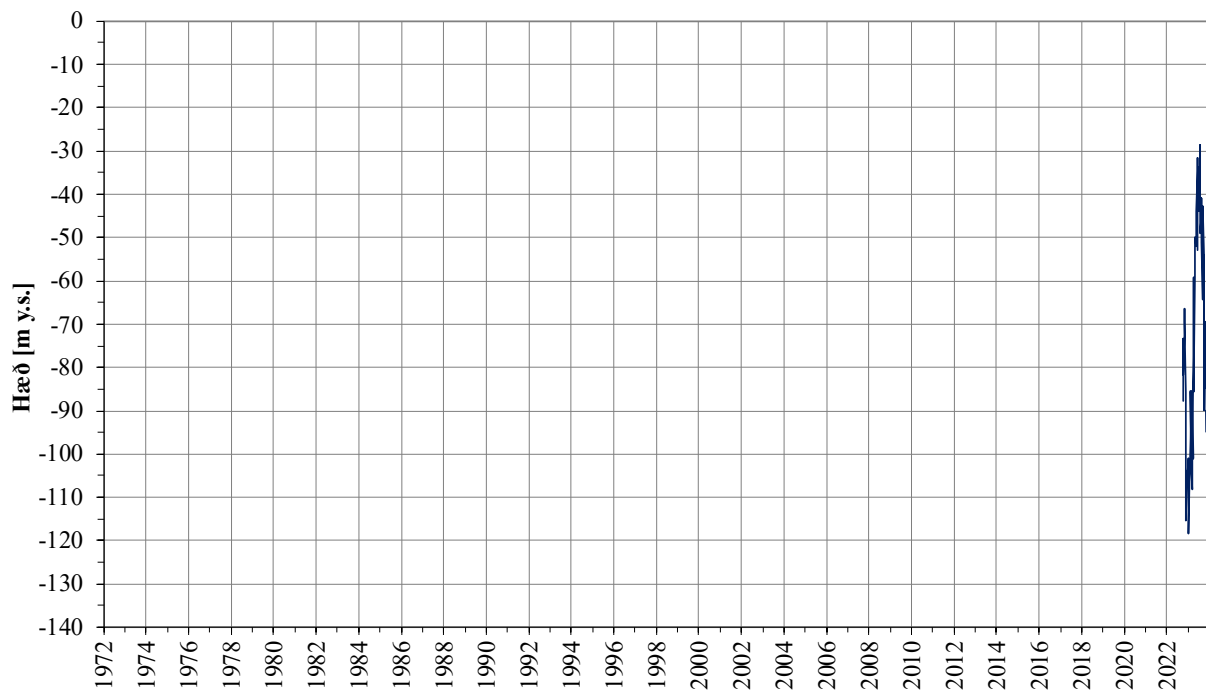
Mynd 29. Mælt vatnsborð í holu SN-05 frá 1972-2023.



Mynd 30. Mælt vatnsborð í holu SN-06 frá 1972-2023.



Mynd 31. Mælt vatnsborð í holu SN-12 frá 1972-2023.



Mynd 32. Mælt vatnsborð í holu SN-17 árið 2023.

8. MAGN OG HITASTIG FRAMRÁSAR OG BAKRÁSARVATNS

Í töflu 12 eru teknar saman magntölur fyrir dælt vatn úr svæðinu og magn framrásar- og bakrásarvatns s.l. ellefu ár.

Tafla 12. Magn og meðalhitastig dælds vatns, framrásar- og bakrennslisvatns. Jafnframt magn selds vatns og hlutfallslegt “tap” kerfis.

Ár	Dæling upp úr svæði L/s	Hitastig dælds vatns °C	Bakrennslisvatn L/s	Hitastig bakrennslisvatns °C	Framrásarvatn L/s	Hitastig framrásarvatns °C	Selt L/s	Út á kerfi m ³	Selt m ³	Tap m ³	Tap %
2013	49,1	106,0	23,3	35	72,6	83,2	63,4	2.290.459,7	1.999.428,8	291.030,90	12,7
2014	46,7	102,2	19,8	33,2	66,6	87,7	61,8	2.099.351,5	1.948.888,8	150.462,70	7,2
2015	50,9	101,1	25,9	35,2	76,0	80,9	64,6	2.396.736,3	2.038.522,0	358.214,3	14,9
2016	49,6	101,6	24,1	34,4	73,6	80,4	68,7	2.327.408,4	2.172.707,0	154.701,6	6,6
2017	49,6	108,7	24,4	36,5	73,9	83,4	64,7	2.329.217,4	2.040.989,0	288.228,4	12,3
2018	54,3	106,2	27,6	38,9	82,5	84,3	64,7	2.601.720,0	2.041.700,8	560.019,2	21,5
2019	54,4	104,6	28,6	38,1	82,9	83,9	84,4	2.613.689,9	2.662.789,8	-49.099,9	-1,9
2020	55,4	105,2	32,5	36,3	87,9	81,9	78,8	2.733.264,0	2.484.075,4	249.188,6	9,1
2021	53,0	105,1	29,7	33,6	82,7	81,1	75,7	2.608.027,0	2.387.096,5	220.930,5	8,4
2022	48,0	108,6	24,4	32,7	72,3	82,6	67,8	2.280.053,0	2.139.585,3	140.467,7	6,2
2023	52,3	106,3	23,7	34,0	76,0	81,8	70,4	2.396.736,0	2.219.082,9	177.653,1	7,4

Jafnframt er sýnt í töflunni hversu mikið var selt af vatni og hlutfallslegt “tap” í kerfinu. Tölur fyrir 2013 eru ónákvæmari en fyrir seinni árin því sumar tölur voru áætlaðar en ekki fengnar úr gagnaskráningarkerfinu.

Eins og fram kom í kafla 6 var meðaldæling úr holunum um 52,3 L/s. Meðalhitastig dælds vatns er 106,3 °C. Það hitastig sem hér er notað fyrir dælda vatnið er meðaltal á mælingum úr holunum, reiknað með tilliti til magns þar sem hitanemi í dælustöð hefur reynst óstöðugur.

Magn bakrennslisvatns var 23,7 L/s og meðalhitastig þess var 34,0 °C. Engin niðurdæling var í holu SN-03 á árinu.

Skráning í dælustöðinni sýnir að 76,0 L/s hafa farið út á kerfið að meðaltali og meðalhitastig framrásarvatnsins hefur verið 81,8 °C. Þetta er nokkru meira vatnsmagn en fór út á kerfið 2022 og hitastig framrásarvatns hefur lækkað um 0,8 °C frá 2022. Hitastig bakrásarvatns var 1,3 gráðum hærra en 2022. Magn framrásarvatns byggist á rennismælingum í dælustöð, en vinnslan er að hluta til áætluð. Eins og oft áður reiknast nokkurt „tap“ í kerfinu þar sem út á kerfið fer meira vatn en selt er. Ekki er um samtímagögn að ræða og tími aflestrar hefur veruleg áhrif á þetta uppgjör og því rétt að líta á meðaltal nokkurra ára. Ekki er óeðlilegt að eitthvert tap sé í kerfinu þar sem alltaf eru lekar í dreifikerfinu og einnig veitir Hitaveitan fólki afslátt verði stórfelldar bilanir sem valda miklu gegnumstreymi í heitavatnskerfum húsa. Þessi samanburður er því ekki mjög nákvæmur en þó rétt að skoða hann sem einn þátt í eftirliti með notkun og vinnslu.

9. SAMANDREGNAR NIÐURSTÖÐUR

1. Á árinu 2023 voru tekin sýni til heildarefnagreininga úr þremur vinnsluholum, SN-05, SN-12 og SN-17.
2. Starfsmenn Hitaveitunnar tóku vikulega sýni og mældu rafleiðni í vinnsluvatni allra holna sem voru í vinnslu. Rafleiðni í vinnsluvatns úr holunum virðist vera örlítið hækkandi. Rafleiðni í SN-17 er hærri en í SN-05, svipuð og í SN-06 og mun lægra en í SN-12.
3. Heildarefnagreiningar á sýnum úr holum SN-05 og SN-12 sýna ekki verulegar breytingar á efnasamsetningu jarðhitavatnsins, nema sem rekja má til mismunandi vinnslu. Sýnið úr holu SN-17 var svipað og síðasta sýni en brennisteinsvetni (H_2S) er nú mælanlegt þó það sé í lágum styrk.
4. Vinnsluvatn úr öllum holum er nánast mettað af kalksteindinni kalsíti og því ekki hættu á útfellingu á holutoppum.
5. Hlutfall stöðugra samsætna súrefnis sýna ekki verulegar breytingar í vinnsluholunum og bendir því ekki til breytinga á vatnskerfinu, sem fæðir jarðhitageyminn.
6. Reiknuð efnajafnvægi í holunum endurspeglar vel mælt hitastig í vatnsæðum hvarrar holu fyrir sig og litlar breytingar eru sjáanlegar milli ára.
7. Rennsli og hiti voru mæld sjálfvirkt á klukkutíma fresti í öllum vinnsluholum.
8. Handvirkar hitamælingar eru til fyrir holur SN-05, SN-06, SN-12 og SN-17.
9. Vatnsborð var handmælt í öllum holum nema SN-06, en sjálfvirkar mælingar voru einnig gerðar í athugunarholum SN-01, SN-02, SN-03 og SN-04.
10. Heildarvinnsla var 52,3 L/s, sem er talsvert herra en 2022, en lægra en 2021. Langmest var vinnslan úr holu SN-17 og næstmest úr SN-05. Einhverjar óvissur eru í vinnslutölunum vegna þess að eyður eru í þeim ásamt ósamræmi milli mælinga á framrásvatni og summu dælingar og bakrennslis.
11. Meðalhiti í holu SN-05 hækkaði árið 2023 frá árinu á undan en lítilleg kólnun var í vinnsluvatni úr holum SN-06 og SN-12 vegna minni vinnslu úr þeim. Meðalhitastig í holu SN-17 var tæplega 111 °C.
12. Hitastig framrásarvatns árið 2023 var 0,8 °C lægra en 2022, en hitastig bakrásarvatns var rúmlega einni gráðu herra en árið áður.
13. Samanburður á magni framrásarvatns og seldu vatnsmagni sýnir rúmlega 7 % “tap” í kerfinu að þessu sinni.
14. Ráðlegt er að huga að nýtingu forðafræðilíkansins við ýmsar breytingar á útfærslu og samsetningu vinnsluholna við hugsanlega bestun á rekstrarfyrirkomulagi hitaveitunnar og til að tryggja sjálfbærni jarðhitakerfisins.

10. HEIMILDIR

Auður Ingimarsdóttir, Helga Tulinius og Hrefna Kristmannsdóttir, 1990. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 1989-1990. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. OS-90049/JHD-29 B, 10 s.

Einar Már Steingrímsson, Guðmundur Jón Helgason og Hrefna Kristmannsdóttir, 2021. Hitaveita Seltjarnarness: Möguleg vinnsla-tillögur. Minnisblað 14.júní, 2021, 3 s.

Fournier, R. O., 1977. Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics* 5, 41-50.

Hrefna Kristmannsdóttir, 1994. Niðurstöður mælinga og prófana í holu SN-6. Orkustofnun Greinargerð, 94/07, 4 s.

Hrefna Kristmannsdóttir, 2008. Sýnataka á jarðhitavatni til efnagreininga. Verklegar leiðbeiningar fyrir námskeiðið Jarðhitafræði JER1103, Viðskipta og Raunvísindadeild, Raunvísindaskor, TS08:05, 15s.

Hrefna Kristmannsdóttir, 2009. Athugun á mögulegum útfellingum í dreifikerfi Hitaveitu Seltjarnarness, TS09:03-Raunvísindaskor, 23s.

Hrefna Kristmannsdóttir, 2021. Greiningar á útfellingum úr varmaskiptum í Hjúkrunarheimilinu Seltjörn. Greinargerð 22.10.2021. 27s.

Hrefna Kristmannsdóttir og Axel Björnsson, 2014a, Orkuöflun fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. Aukin vatnsöflun og bætt nýting. TS14-01, Jarðvísindastofa Hrefnu Kristmannsdóttur og Axels Björnssonar, 51s.

Hrefna Kristmannsdóttir og Þorsteinn Thorsteinsson, 1988. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnsluefirlit 1988. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. Orkustofnun, OS-88062/JHD-32 B, 12 s.

Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2003. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnsluefirlit 2002-2003. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness, 34 s.

Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2004. Hitaveita Seltjarnarness. *Vinnsluefirlit 2003-2004*. Skýrsla nr. 04/03. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness, 36 s.

Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2005. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnsluefirlit 2004-2005. Skýrsla nr. 05/05. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness, 38 s.

Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2006. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnsluefirlit 2005-2006. Skýrsla nr 06/02. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness, 37 s.

Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2007. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnsluefirlit 2006-2007. Skýrsla nr 07/09. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness, 36 s.

Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2008. *Hitaveita Seltjarnarness*. Vinnsluefirlit 2007-2008. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 08/01, 37 s.

Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2009. *Hitaveita Seltjarnarness*. Vinnsluefirlit 2008-2009. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 09/03, 39 s.

Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2010. *Hitaveita Seltjarnarness*. Vinnsluefirlit 2009-2010. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 10/01, 42 s.

Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2011. *Hitaveita Seltjarnarness*. Vinnsluefirlit 2010-2011. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 11/02, 40 s.

Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2012. *Hitaveita Seltjarnarness*. Vinnsluefirlit 2011-2012. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 12/05, 43 s.

- Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2013. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 2012-2013. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 13/03, 49 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2014. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 2013-2014. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 14/06, 50 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2015. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 2014-2015. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 15/01, 50 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2016. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 2015-2016. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 16/03, 50 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2017. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 2016-2017. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 17/04, 41 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2018. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 2017-2018. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 18/02, 40 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2019. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 2018-2019. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 19/03, 42 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2020. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 2019-2020. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 20/02, 41 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2021. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 2020-2021. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 21/01, 42 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir og Verkfræðistofan Vatnaskil, 2022. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 2020-2021. Verkfræðistofan Vatnaskil, Skýrsla nr. 22/03, 52 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, Helga Tulinius, Þorsteinn Thorsteinsson og Guðrún Sverrisdóttir, 1991. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 1990-1991. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. Orkustofnun, OS-91049/JHD-28 B, 11 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, Guðrún Sverrisdóttir og Hilmar Sigvaldason, 1992. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 1991-1992. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. Orkustofnun, OS-93061/JHD-34 B, 15 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, Guðrún Sverrisdóttir og Hilmar Sigvaldason, 1993. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 1992-1993. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. Orkustofnun, OS-93077/JHD-39 B, 17 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, Helga Tulinius og Guðrún Sverrisdóttir, 1994. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 1993-1994. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. Orkustofnun, OS-94062/JHD-36 B, 15 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, Helga Tulinius, Guðrún Sverrisdóttir og Sverrir Hákonarson, 1995. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 1994-1995. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. OS-95061/JHD-40 B, 18 s.

Hrefna Kristmannsdóttir, Helga Tulinius og Magnús Ólafsson 1996. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 1995-1996. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. OS-96083/JHD-48 B 24 s.

Hrefna Kristmannsdóttir, Sigvaldi Thordarson og Magnús Ólafsson 1997. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 1996-1997. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. OS-96078, 28 s.

Hrefna Kristmannsdóttir, Sigvaldi Thordarson og Magnús Ólafsson 1998. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 1997-1998. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. OS-96076, 27 s..

Hrefna Kristmannsdóttir, Sigvaldi Thordarson og Vigdís Harðardóttir 1999. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 1998-1999. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. OS-99107, 24 s.

Hrefna Kristmannsdóttir, Helga Tulinius og Jón H. Björnsson, 2001. Nýting jarðhitasvæðisins á Seltjarnarnesi í þrjátíu ár. Orkuþing, Reykjavík, 593-600.

Hrefna Kristmannsdóttir, Helga Tulinius og Vigdís Harðardóttir 2002. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 2000-2001. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. OS-2002/007, 30 s.

Kristmannsdóttir, H., 1989. Types of scaling occurring by geothermal utilization in Iceland. *Geothermics*, 18, 183-190.

Kristmannsdóttir, H., Thorhallsson, S. and Hardardóttir, V. 2004. Types of scales encountered in district heating systems in Iceland. *Proceedings 13th Scandinavian Corrosion Congress*, 7p.

Kristmannsdóttir, H. and Ármannsson, H., 1996. Chemical Monitoring of Icelandic Geothermal Fields during Production. *Geothermics*, 25, 349-364.

Kristmannsdóttir, H. and Tulinius, H. 2000. The development of the Seltjarnarnes geothermal field, SW Iceland during thirty years production. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Japan, 3465-3470.

Kristmannsdóttir, H., Thorhallsson, S. and Hardardóttir, V. 2004. Types of scales encountered in district heating systems in Iceland. *Proceedings 13th Scandinavian Corrosion Congress*, 7p.

Kristmannsdóttir, H., Stefánsson S. E. and Björnsson, A., 2015.: Sustainable Geothermal Production of the Seltjarnarnes Geothermal Field, SW-Iceland. *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Melbourne, Australia.

Kristmannsdóttir, H, Myer, E., Pálmarrson, S.Ó, Björnsson, A., Þorbergsson, E.M., Guðfinnsson, S. 2021. Sustainable Development of the Seltjarnarnes Geothermal Field, Iceland, Through Exploration Drilling and Reservoir Modelling. *Proceedings World Geothermal Congress 2021 Reykjavik, Iceland, October, 2021*.

Schwartz, F. W. and Zang, H. 2003. *Fundamental of Ground Water*. John Wiley & Sons.

Verkfræðistofan Vatnaskil, 1994. Reiknilíkan af jarðhitasvæðunum á Seltjarnarnesi. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness.

Verkfræðistofan Vatnaskil, 2002. Seltjarnarnes. Þrívítt reiknilíkan af jarðhitasvæði. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness.

Verkfræðistofan Vatnaskil, 2016. Seltjarnarnes. Reiknilíkan af jarðhitasvæðinu. Uppfærsla líkans og hermun framtíðarvinnslutilfella. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. Skýrsla nr. 16.01, 68 s.

Verkfræðistofan Vatnaskil, 2021. Greining á dælingarprófs við holu SN-04. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. Minnisblað MB-21.14.

Vigdís Harðardóttir, Helga Tulinius og Hrefna Kristmannsdóttir, 2000. Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 1999-2000. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. OS-2000/088, 22 s.

Þorsteinn Thorsteinsson og Magnús Ólafsson, 1989 Hitaveita Seltjarnarness. Vinnslueftirlit 1989. Unnið fyrir Hitaveitu Seltjarnarness. OS-89044/JHD B, 10 s.

Viðauki 1

Framkvæmd sýnatöku og efnagreininga

Við sýnatöku og mælingar er fylgt leiðbeiningum skv. Skýrslu Hrefnu Kristmannsdóttur frá 2008 (Hrefna Kristmannsdóttir, 2008).

Safnað er eftirfarandi tegundum sýna:

1. Í 250 ml glerflösku ómeðhöndluðu sýni (**Ru**), til mælinga á pH.
2. Í 200 ml plastflösku síuðu sýni (**Fu**), til mælinga á anjónum.
3. Í 50 ml brúna glerflösku síuðu sýni (**Fu**), til vetnis og súrefnissamsætumælinga.
4. Í 200 ml sýruþvegna flösku, síuðu sýrðu sýni (**Fa**), sýrðu með með 1 ml af háhreinni mettaðri saltþétursýru (HNO_3) til mælinga á aðalmálmum og snefilefnum. Sýnin eru greind á rannsóknarstofunni í Luleå.

Við sýnatöku eru öll sýnin kæld niður í um 20 °C undir þrýstingi í stálspiral.

Mælingar:

Súrefni er mælt á staðnum með Chemetrix ampúlum. Brennisteinsvetni er einnig mælt á staðnum með títrun með kvikasilfursasetati.

Sýni til mælinga á pH, karbónati og leiðni (sýni nr. 1.) er mælt innan þriggja daga. pH er mælt beint í flösku og hrært í með segulhræru á meðan. Karbónat er mælt með pH títrun (með 0,1 N HCl) niður í pH 3,8 og er baktítrað eftir að búið er að blása lofti í gegnum sýnið í um 10 mínútur til að losna við CO_2 úr því. Títrað svo tilbaka (með 0,1 N NaOH) upp í 8,3.

Anjónirnar flúor (Cl), (F) og súlfat (SO_4) (sýni nr. 2) eru mæld á jónagreini á Rannsóknarstofu ALS í Luleå í Svíþjóð.

Stöðugar samsætur, vetni og súrefni eru mældar á massagreini Raunvísindastofnunar Háskóla Íslands (sýni 3)

Helstu málmar, natríum (Na), kalíum (K), kalsíum (Ca), magnesíum (Mg), járn (Fe), ál (Al), strontíum (Sr) svo og efnin kísill (SiO_2), bór (B) voru mæld á ICP-AES tæki á rannsóknarstofu ALS í Luleå (sýni 4).

Snefilefnin ál (Al), bór (B), baríum (Ba), bróm (Br), cadmíum (Cd), króm (Cr), kopar (Cu), járn (Fe), kvikasilfur (Hg), líþíum (Li), mangan (Mn), eru mæld (sýni 4) á ICP-MS tæki á rannsóknarstofu ALS í Luleå í Svíþjóð. Í reglulegu vinnslueftirliti eru aðeins sumir snefil-málmanna mældir.

Áætluð mælióvissa fyrir mismunandi efni er sýnd í töflu 13

Tafla 13. Mælióvissa fyrir mismunandi efni.

Efni	Mælióvissa
pH/°C	±0,05
SiO ₂ mg/L	±7,0
B mg/L	±0,03
Na mg/L	±50
K mg/L	±1.0
Ca mg/L	±50
Mg mg/L	±0.03
Sr mg/L	±0.2
Fe mg/L	±0.001
Al mg/L	±0.004
CO ₂ mg/L	±0.1
H ₂ S mg/L	±0.003
Leiðni. µS/cm v.25°C	±10
O ₂ mg/L	±0,002
SO ₄ mg/L	±20
Cl mg/L	±50
F mg/L	±0.05
Ba µg/L	±7
Cd µg/L	-
Cr µg/L	±0,04
Cu µg/L	-
Hg µg/L	±0,01
Li µg/L	-
Mn µg/L	±0,7
Rn Bq/L	±1.0
δ ² H%	±2.0
δ ¹⁸ O%	±0.05