



Áhrif jarðhitanyýtingar í Bjarnarflagi á volga grunnvatnsstrauminn til Mývatns

Áhrif jarðhitanytingar í Bjarnarflagi á volga grunnvatnsstrauminn til Mývatns



ÍSOR-2013/038

Verknr.: 13-0252

September 2013

Lykilsíða



Skýrsla LV nr.: LV-2013-096

Dags: September 2013

Fjöldi síðna: 42

Upplag: 8

Dreifing:

☒ Birt á vef LV

☒ Opin

☐ Takmörkuð til

Titill:

Áhrif jarðhitánýtingar í Bjarnarflagi á volga grunnvatnsstrauminn til Mývatns

Höfundar/fyrirtæki:

Magnús Ólafsson, Þráinn Friðriksson, Þórólfur H. Hafstað, Sigríður Sif Gylfadóttir, Finnbogi Óskarsson og Halldór Ármannsson

Verkefnisstjóri:

Sigurður H. Markússon f.h. LV

Anette K. Mortensen f.h. ÍSOR

Unnið fyrir:

Unnið af Íslenskum orkurannsóknnum fyrir Landsvirkjun

Samvinnuaðilar:

Útdráttur:

Í skýrslunni er greint frá rannsóknum og vöktun á grunnvatnskerfinu við austanvert Mývatn, rennislíðum og efnasamsetningu þess og uppruna, vöktun kerfisins m.t.t. hita- og efnabreytinga og reynt að meta hvort jarðhitánýtingin í Bjarnarflagi og Kröflu hafi haft áhrif á grunnvatnsstrauminn til Mývatns. Þá eru einnig lagðar fram tillögur um eftirlit og vöktun grunnvatnsins. Langstærsti hluti grunnvatnsstreymis til Mývatns er hluti af gríðarlegum grunnvatnsstraum í NA-gosbeltinu sem rekja má allt til Dyngjufjalla í suðri og á haf út í Öxarfirði. Hluti grunnvatnsins úr suðri hitnar af völdum jarðhitakerfanna í Námafjalli og Kröflu. Líkanreikningar sýna að um 11 m³/s af köldu og volgu vatni falla til Ytriflóa og um 17 m³/s til Syðriflóa. Miklar náttúrulegar breytingar urðu á grunnvatnskerfinu í Kröflueldum 1975 til 1984 og einnig í Mývatnseldum 1724 til 1729.

Efnasamsetning og samsætuhlutföll í volgu grunnvatni í Mývatnssveit benda til þess að vatnið sé að litlu leyti gufuhitað grunnvatn heldur sé það kalt grunnvatn sem blandast hefur jarðhitavökva. Tvívætnishlutföll og hlutfall Cl og B í grunnvatninu benda til þess að jarðhitavökvinn sem hefur blandast grunnvatninu sé ættaður úr jarðhitakerfinu í Kröflu.

Af vöktunarsögunni má draga þá ályktun að ekki sé ástæða til að búast við áhrifum á Mývatn af núverandi fyrirkomulagi og enn síður ef affallsvökva fyrirhugaðrar virkjunar í Bjarnarflagi verður dælt niður. Áætluð vinnsla 45 MW virkjunar í Bjarnarflagi nemur um 180 kg/s. Niðurdæling jarðhitavökva frá henni mun draga enn frekar úr líkum á að grunnvatn vestan Námafjalls, og þar með innrennsli í Mývatn, verði fyrir áhrifum jarðhitavinnslu á svæðinu.

Lykilorð:

Mývatn, jarðhiti, Bjarnarflag, Bjarnarflagsvirkjun, Námafjall, Krafla, Kröfluvirkjun, grunnvatn, rennsli, efnavöktun, borholur, lindir

ISBN nr.:

Samþykki verkefnisstjóra
Landsvirkjunar

Undirskrift verkefnisstjóra

Yfirfarið af

KS

English summary

The report gives an overview of investigations and monitoring of the groundwater system which have been carried out in the Lake Mývatn area. It describes the groundwater flow, the chemistry of the groundwater and its origin. The main emphasis is on temperature and chemical changes that have occurred and to evaluate whether the production from the Bjarnarflag and the Krafla high-temperature systems has affected the groundwater entering Lake Mývatn.

The majority of the groundwater entering Lake Mývatn is a part of a very large groundwater system within the northeastern volcanic zone, extending from Dyngjufjöll and Vatnajökull in the south to Öxarfjörður and the Atlantic Ocean in the north. Part of the groundwater is heated by the Bjarnarflag and Krafla geothermal systems and model calculations show that the warm groundwater flowing to Ytriflóir amounts to approximately 11 m³/s, whereas the cold groundwater entering Syðriflóir is approximately 17 m³/s.

During the Krafla Fires, 1975 to 1984, extensive changes took place within the groundwater system east of Lake Mývatn. The temperature of the groundwater increased, in some places up to twenty degrees, and the chemistry changed accordingly. Based on contemporary sources it is believed that similar or even more drastic changes occurred in the area and within the groundwater system during the Mývatn Fires 1724 to 1729.

Based on the chemistry and the isotopic composition of the cold and warm groundwater it is proposed that the warm groundwater is only partly derived by steam heating but mainly derived by mixing with geothermal water from the Krafla geothermal system.

Extensive monitoring of the groundwater system, which in some places began before the Krafla Fires, and even dates back to the time when the first drillholes were drilled in 1963, have not found any signs of influence of the power production in Bjarnarflag on the springs along the eastern shore of Lake Mývatn.

For the last ten years arsenic (As) has been used to monitor the possible influence of effluent water from the Bjarnarflag and Krafla power stations to the groundwater. The results show that the arsenic concentration of the groundwater east of lake Mývatn is below the Environmental limit I (< 0,004 mg/L) and most often below the detection limit (< 0,00005 mg/L). The only water whose arsenic concentration exceeds the maximum permitted value for drinking water (0.01 mg/L) is the effluent water sampled directly from the outflow from the separation stations and in the stream Hlíðardalslækur.

The mass flow of steam and water for the proposed 45 MW geothermal power station in Bjarnarflag is estimated to be approximately 180 kg/s, similar to the mass flow from the system in 1970 to 1978. During the last ten years the production from the geothermal system has been about 100 kg/s and close to 50 kg/s in the period 1980 to 2005. Monitoring of temperature and pressure in wells in Bjarnarflag indicates that the mass extraction from the geothermal system has caused no pressure drawdown down to a depth of 600 m and very limited drawdown below that, mainly beneath the Námafjall ridge.

The interaction between the geothermal fluids from the geothermal systems in Krafla and Bjarnarflag and one of the largest groundwater systems in Iceland is considerable and complex. However, research shows that natural changes, in particular due to volcanic eruptions, have had a significant impact on this interaction, while no measurable impact has been detected due to utilisation of the geothermal fields in Bjarnarflag and Krafla.

Efnisyfirlit

1	Inngangur	7
2	Grunnvatnskerfið við austanvert Mývatn	8
2.1	Aðrennsli og afrennsli Mývatns	8
2.2	Líkanreikningar	12
3	Vöktun grunnvatns	13
3.1	Náttúrulegar breytingar	14
3.2	Vöktun grunnvatns	19
4	Efnafræði grunnvatns og uppruni þess	27
4.1	Gagnasafn	29
4.2	Gufuhitað grunnvatn samanborið við jarðhitavökva	31
4.3	Uppruni jarðhitavökvans í volga grunnvatninu í Mývatnssveit	32
4.4	Klóríðstyrkur, Cl/B hlutfall og tvívetni í jarðhitavökva frá Kröflu og Námafjalli	34
5	Tengsl lífríkis og efnafræði grunnvatns	35
6	Vinnsla úr jarðhitakerfinu	36
7	Vöktunaráætlun fyrir 45 MW virkjun í Bjarnarflagi	38
8	Lokaorð og helstu niðurstöður	38
9	Heimildaskrá	41

Töflur

Tafla 1.	Umhverfismörk fyrir málma í yfirborðsvatni til verndar lífríki (styrkur efna í mg/L)	21
Tafla 2.	Yfirlit um ferilprófanir í Mývatnssveit. Niðursetningarstaðir eru sýndir á mynd 17.	26

Myndir

Mynd 1.	Helstu drættir grunnvatnsstreymis við austanvert Mývatn	8
Mynd 2.	Helstu lindasvæði við austanvert Mývatn og hitastig fyrir og eftir Kröfluelda.	9
Mynd 3.	Lind 13 í Auðnavík í Vogaflóa. Myndin sýnir hitastig og styrk kísils	11
Mynd 4.	Stóragjá. Myndin sýnir hitastig og kísilstyrk frá 1974 og fram yfir 2000	11
Mynd 5.	Munur á grunnvatnshæð í reiknilíkönunum Vatnaskila frá 1999 og 2008	13
Mynd 6.	Mældur hiti vatns og styrkur kísils (SiO ₂) í Grjótagjá (karla) 1973–2012.	15
Mynd 7.	Samband hita vatns og kísilstyrks í grunnvatni í Mývatnssveit	15
Mynd 8.	Styrkur klóríðs í grunnvatni við austanvert Mývatn og í affallsvatni frá orkuverum í Bjarnarflagi og Kröflu	16
Mynd 9.	Styrkur klóríðs og hiti grunnvatns við austanvert Mývatn og affallsvatns frá orkuverum í Bjarnarflagi og Kröflu	17
Mynd 10.	Jafnhitalínur í grunnvatni við austanvert Mývatn í maí 1983 og árið 2000	18

Mynd 11. <i>Hiti vatns og styrkur kísils í Langavogi, 1980–2012.</i>	18
Mynd 12. <i>Myndin sýnir heildarvinnslu úr jarðhitakerfinu í kílótonnum (ktonn).</i>	19
Mynd 13. <i>Myndin sýnir magn affallsvatns sem dælt er í borholur annars vegar og rennur í Hlíðardalslæk hins vegar.</i>	20
Mynd 14. <i>Styrkur arsens í sýnum af affallsvatni frá Kröflu- og Bjarnarflagsvirkjunum og úr Hlíðardalslæk við holu AB-2 á árunum 1997–2012 ásamt umhverfismörkum I, II, III og IV</i>	22
Mynd 15. <i>Styrkur arsens í vatni úr holum í Búrfellshrauni, AB-2 og LUD-2, LUD-3 og LUD-4 á árunum 1997–2012 ásamt umhverfismörkum I og II</i>	23
Mynd 16. <i>Styrkur arsens í lindum við Mývatn, úr Grjótagjá, Langavogi og Vogaflóa, á árunum 1997–2012 ásamt umhverfismörkum I</i>	24
Mynd 17. <i>Niðurstetningarstaðir ferilefna, grunnvatnsflokkar og helstu rennislíðir.</i>	25
Mynd 18. <i>Samsætuhlutföll vetnis og súrefnis í vatni í Mývatnssveit og flokkun þess</i>	28
Mynd 19. <i>Sýnatökustaðir affallsvatns og grunnvatns í Mývatnssveit.</i>	30
Mynd 20. <i>Styrkur CO₂ í grunnvatni úr Mývatnssveit á móti hitastigi við söfnun.</i>	31
Mynd 21. <i>Styrkur Cl í grunnvatni úr Mývatnssveit á móti hitastigi við söfnun</i>	32
Mynd 22. <i>Vetrissamsætuhlutfall grunnvatns í Mývatnssveit á móti hitastigi.</i>	33
Mynd 23. <i>Massahlutfall Cl og B í grunnvatni í Mývatnssveit</i>	34
Mynd 24. <i>Meðalársvinnsla jarðhitavökva og áætlað gufuflæði úr jarðhitakerfinu í Námafjalli ásamt mældum niðurdrætti í borholum í Bjarnarflagi.</i>	37
Mynd 25. <i>Einfaldað líkan af grunnvatnskerfinu við austanvert Mývatn og samspili þess við jarðhitakerfin í Námafjalli og Kröflu.</i>	39

1 Innangangur

Að undanfögnu hefur mikil umræða verið um áhrif fyrirhugaðrar Bjarnarflagsvirkjunar á grunnvatn í Mývatnssveit og sérstaklega um áhrif hennar á volga/heita grunnvatnsstrauminn til Mývatns. Vatnið í volgu uppsprettunum í austurbakka Ytriflóa er ein af forsendum þess ríkulega lífríkis sem þrífst í Mývatni, einkum er kísill í volga vatninu nauðsynlegur fyrir vöxt og viðgang kísilþörunga. Í þessu samhengi skiptir því miklu máli að þekkja uppruna og eðli grunnvatnsins við austanvert Mývatn.

Jarðhiti hefur verið nýttur í Bjarnarflagi um margra áratuga skeið, eða allt frá því fyrst var borað þar eftir gufu árið 1963. Í byrjun var vinnslan lítil en jókst verulega í upphafi áttunda áratugarins og varð mest rúmlega 200 kg/s. Í umbrotum Kröfluelda skemmdust flestar borholur í Bjarnarflagi og vinnslan minnkaði í um 50 kg/s og var þannig fram á fyrsta áratug þessarar aldar. Þá hófust rannsóknarboranir á svæðinu og vinnsla vegna rafmagnsframleiðslu í gufuaflstöðinni í Bjarnarflagi, til hitaveitu og Jarðbaða, ásamt prófunum á nýjum holum, hefur numið um 100 kg/s síðustu árin. Þrýstingslækkun í jarðhitakerfinu hefur verið óveruleg á vinnslutímanum. Í þessu samhengi má nefna að gert er ráð fyrir að 45 MW raforkuver í Bjarnarflagi þurfi um 180 kg/s.

Kalt og heitt grunnvatn við austanvert Mývatn hefur verið vaktað með einum eða öðrum hætti um langt árabil nánast frá því vinnsla hófst úr jarðhitakerfinu í Námafjalli. Fylgst hefur verið með hita þess, rennslisleiðir kannaðar, grunnvatnslíkön gerð á grundvelli mælinga í borholum, lindum og laugum og efnasamsetning þess rannsökuð. Telja má fullvíst að á engu íslensku háhitasvæði hafi verið fylgst jafn náið með eðli og breytingum í grunnvatnskerfi og við háhitasvæðið í Námafjalli, enda ástæða til vegna hins einstæða lífríkis í Mývatni.

Lífríki Mývatns, jafnt í vatninu og umhverfis það, hefur einnig verið vaktað ítarlega um áratuga skeið. Vistkerfið er breytilegt bæði í tíma og rúmi og er talið að svæðisbundinn breytileiki stafi fyrst og fremst af mismunandi eiginleikum grunnvatnsins sem í vatnið rennur.

Í Kröflueldum 1975 til 1984 urðu miklar breytingar á háhitasvæðinu í Bjarnarflagi og á grunnvatnkerfinu við austanvert Mývatn. Hiti grunnvatns hækkaði staðbundið um a.m.k. 20°C og efnasamsetning þess breyttist mikið. Þá urðu einnig verulegar landhæðarbreytingar við Mývatn samhliða umbrotunum. Allt hafði þetta áhrif á streymi volgs vatns til Mývatns og efnasamsetningu þess. Líklegt verður að teljast að hiti grunnvatns við austanvert Mývatn hafi breyst mikið í Mývatnseldum 1724 til 1729 og efnasamsetning vatnsins einnig og vel má vera að breytingarnar hafi verið enn meiri en í Kröflueldum.

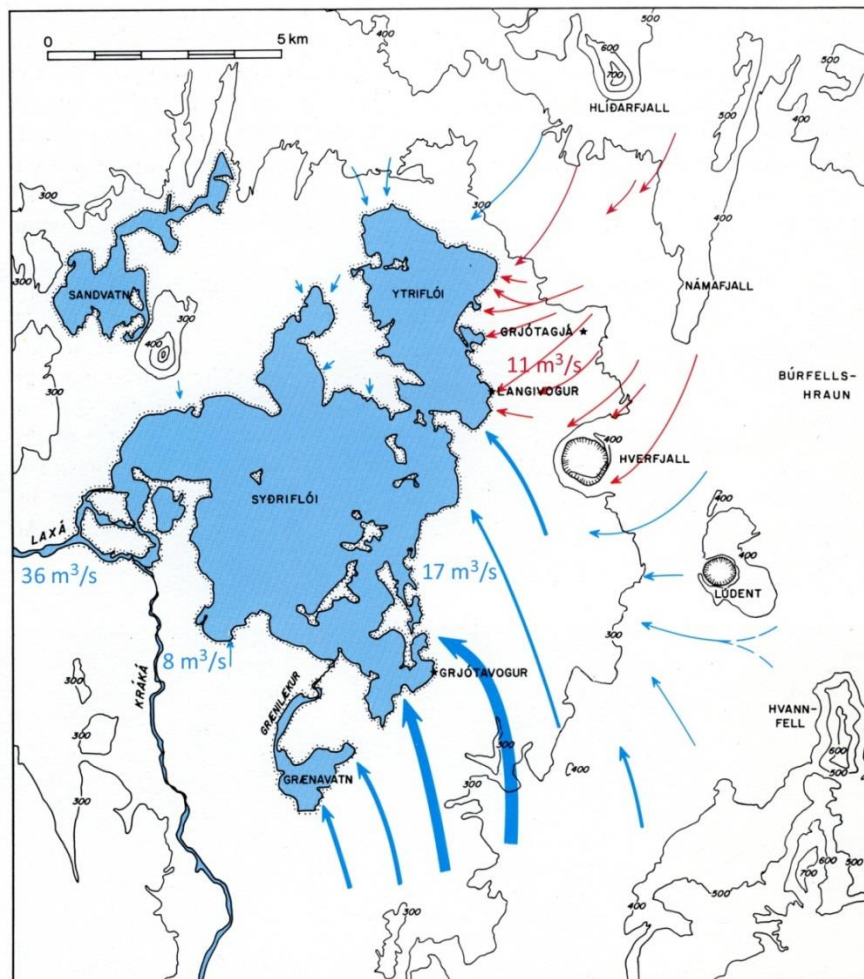
Í skýrslunni er greint frá rannsóknum og vöktun á grunnvatnskerfinu við austanvert Mývatn, rennslisleiðum og efnasamsetningu þess og uppruna, vöktun þess m.t.t. hita- og efnabreytinga og reynt að meta hvort jarðhitánýtingin í Bjarnarflagi og Kröflu hafi haft áhrif á grunnvatnstrauminn til Mývatns. Þá eru einnig lagðar fram tillögur um viðbót við eftirlit og vöktun grunnvatnsins.

2 Grunnvatnskerfið við austanvert Mývatn

2.1 Aðrennsli og afrennsli Mývatns

Náttúra Mývatnssveitar er rómuð, ekki síst vegna líffræðilegs breytileika. Allur á hann rót að rekja til grunnvatnsstrauma sem skapa hin sérstæðu lífsskilyrði í stöðuvatninu. Grunnvatnið stjórnast mjög af jarðfræðilegri gerð grannsvæðisins en þar er eldstöðvakerfi sem þrisvar hefur bært á sér frá því búseta hófst við Mývatn. Sveiflur í lífríkinu gætu því hafa orðið nokkrar, jafnvel miklar og meiri en þar sem langvinnt jafnvægi ríkir.

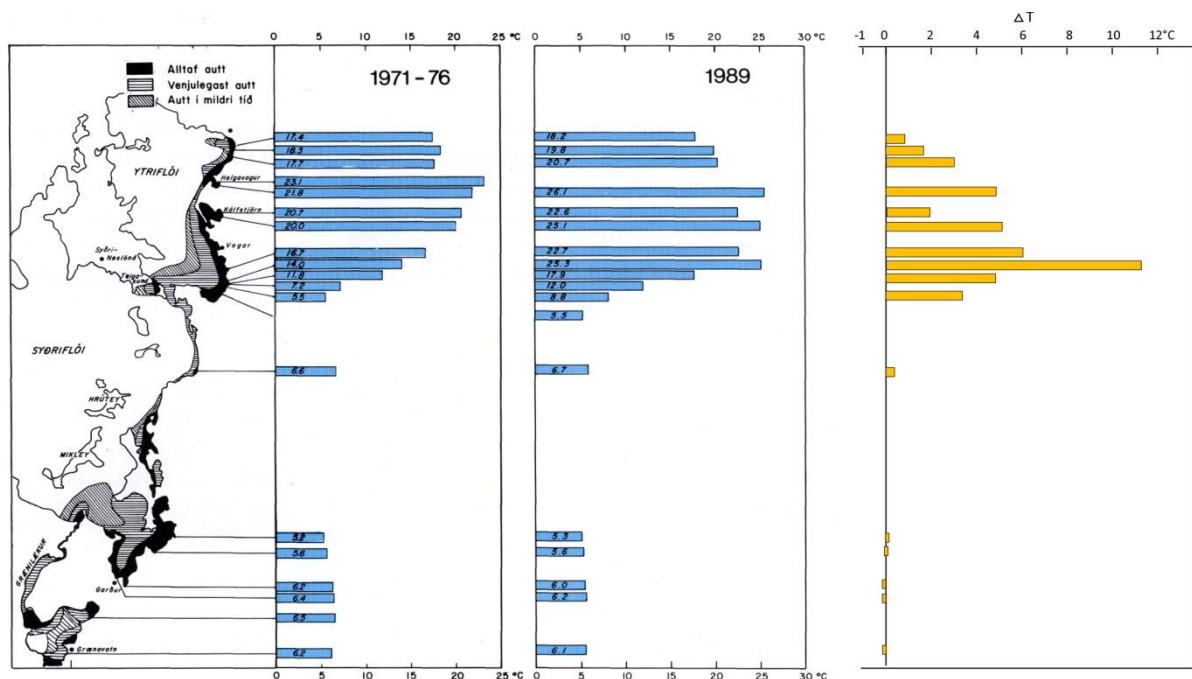
Mývatn er eitt stærsta lindasvæði landsins. Vatnasviðið er talið vera um 1500 km² að flatarmáli. Samkvæmt líkani Vatnaskila (2008) renna um 36 m³/s af vatni í Laxá við Helluvað sem er ívið meira en rennsli í Brúará syðra. Þingvallavatn er hins vegar langstærsta lindasvæði landsins en þar koma fram um 85 m³/s af vatni. Grunnvatnsaðrennsli til Mývatns er allvel þekkt. Það er bæði vegna vöktunar á afrennsli frá orkuverunum í Kröflu og Bjarnarflagi og ekki síður vegna þess að fylgst hefur verið með breytingum sem urðu á grunnvatnshita við austanvert vatnið samfara Kröflueldum.



Mynd 1. Helstu drættir grunnvatnsstreymis við austanvert Mývatn (Jón Ólafsson, 1991; Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson, 1983; Verkfræðistofan Vatnaskil, 2008). Kaldir straumar eru sýndir með bláum pílum en volgir með rauðum. Skilin þarna á milli liggja vestur af Hverfjalli í Auðnavík við Ytriflóa.

Aðrennsli Mývatns er nánast allt grunnvatn sem streymir úr öllum áttum til lægðarinnar sem vatnið situr í. Samt er streymið langmest úr suðri eins og kemur glögggt fram á mynd 1. Vatnið berst einkum í Mývatn austanvert þar sem ótal lindir raða sér meðfram vatnsbakkanum og einnig kemur töluvert vatn upp úti í vatninu. Helstu lindasvæðin eru sýnd á mynd 2. Mynd 2 sýnir einnig hitastig einstakra linda á árunum 1971 til 1976 annars vegar og 1989 hins vegar, þ.e. fyrir og eftir Kröfluelda og þar kemur fram afgerandi munur á vatnshita bæði í tíma og rúmi.

Vatnasvið Mývatns er afar víðáttumikið og þar eru jarðlög víðast hvar gropin hraun og lítt grónir sandar. Það veldur því að næstum öll úrkoma, sem á svæðið fellur, sigur í jörð og rennur svo af landinu sem grunnvatn. Stór hluti grunnvatnsins er langt að kominn. Samkvæmt tvívetnismælingum má ætla að það sé að verulegu leyti ættað allt innan frá Dyngjufjöllum (Bragi Árnason, 1976).



Mynd 2. Helstu lindasvæði við austanvert Mývatn og hitastig fyrir og eftir Kröfluelda. Hægra megin er sýndur mismunahita fyrir og eftir Kröfluelda (ΔT). Myndin sýnir glögglega hvernig volga grunnvatnið sem rennur út í Ytriflóa hitnaði í Kröflueldum en engin breyting varð á hita kalda grunnvatnsins sem rennur í Syðriflóa (Jón Ólafsson, 1991). Mun meiri breytingar urðu þó á einstökum stöðum eins og t.d. Grjótagjá.

Samkvæmt grunnvatnslíkaninu falla um 11 m³/s til Ytriflóa, að mestu volgt vatn. Í Syðriflóa renna 17 m³/s af grunnvatni þar sem kalda straumurinn úr suðri ræður algerlega ríkjum (Verkfræðistofan Vatnaskil, 2008). Heildarrennsli af vatnasviði Krákár og Grænalækjar sunnan Mývatns reiknast um 8 m³/s.

Afrennsli Mývatns er um Laxá og nálega allt rennsli til hennar er grunnvatn að uppruna. Eðli samkvæmt eru rennslissveiflur litlar, eins og vænta má í lindavatni. Rennsli til Laxár er mælt við útfallið á rennslismælistað við Helluvað og er það að jafnaði um 36 m³/s

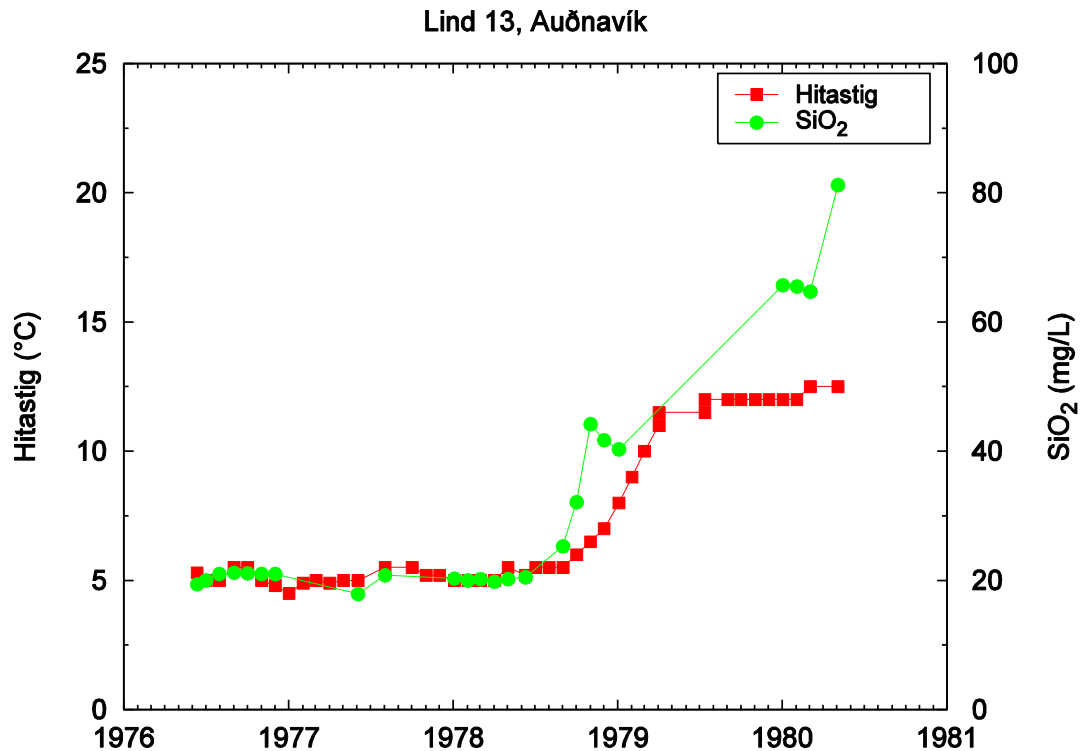
(Verkfræðistofan Vatnaskil, 2008). Lindapáttur árinna er metinn vera 42 m³/s við Brettingsstaði í Laxárdal. Almennt talað er þetta um tífalt rennsli Elliðaáanna, sem spretta upp við nokkuð sambærilegar aðstæður.

Hluti af volga grunnvatninu, sem flæðir út í Ytriflóa, hefur mun styttri aðdraganda en meginstraumurinn úr suðri. Það á að verulegu leyti rót sína að rekja til jarðhitasvæðanna í Námafjalli og Kröflu, eins og rakið er hér á eftir, og er þar af leiðandi undir sterkum jarðhitaáhrifum. Þar getur verið um að ræða blöndun á heitu vatni og köldu sem kemur fram í efnasamsetningu en líka í beinni hitnun, til að mynda vegna gufuuppstreymis. Þar er ekki alltaf auðvelt að greina á milli, sérstaklega þar sem um mikinn náttúrulegan breytileika hefur verið um að ræða á þeim tíma sem svæðið hefur verið rannsakað.

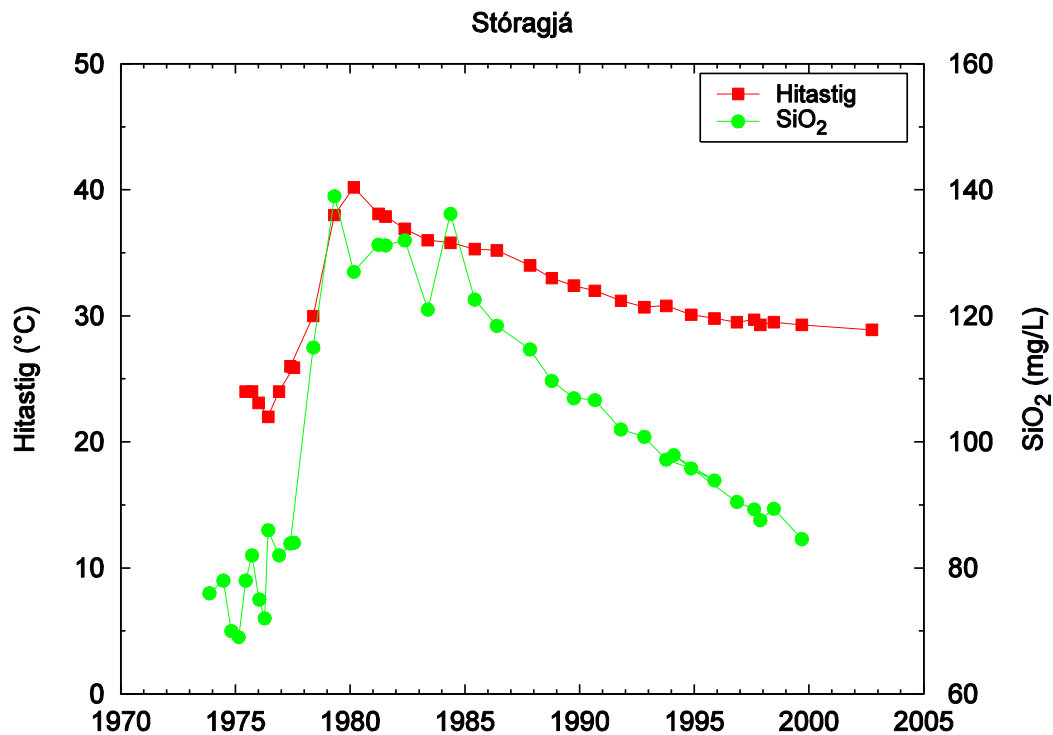
Við austanvert Mývatn eru fjölmargir mælistaðir og til eru langar mæliraðir úr þeim. Á mynd 19 er sýnd staðsetning nokkurra þeirra staða, sem notaðir eru í reiknilíkani Vatnaskila (2008). Að auki eru fjölmargir vatnshæðarmælistaðir utan hins eiginlega Mývatnssvæðis. Grunnvatnsstreymið til Mývatns er aðeins hluti af miklu stærra grunnvatnskerfi. Þetta kerfi spannar allt virka gosbeltið á Norðausturlandi milli Skjálfandafljóts og Jökulsár á Fjöllum, allt frá Vatnajökli og út til hafs.

Þarna er um að ræða fjölmargar grunnvatnsmælingaholur, ótal lindir, sprungur og gjár þar sem tekin hafa verið sýni til efnagreininga, rennsli mælt, hitamælt og vatnsstaða tekin. Á svæðinu við austanvert Mývatn og við Kröflu eru á fjórða tug mælistaða og að auki tekur grunnvatnslíkanið tillit til fjarlægari staða innan gosbeltisins. Sumar þessara mælinga hafa verið gerðar reglulega um árabil og beinlínis vegna vöktunar á frárennsli frá Kröflu og Bjarnarflagi en aðrar á almennum grunnvatnsaðstæðum við og í Mývatni á ýmsum tímum. Sumar þessara rannsókna tengjast beint undirstöðum lífríkis í vatninu (Jón Ólafsson, 1991) og enn aðrar til að mynda umbrotum og vatnsborðsbreytingum vegna Kröfluelda. Þessar rannsóknir eru ekki allar tíundaðar hér en allar leggja þær sitt til að gera myndina af aðrennslinu út í Mývatn sem skýrasta. Hér á eftir verða tínd til ýmis mæligögn og aðrar upplýsingar sem sýna hinn mikla breytileika í hita og efnainnihaldi grunnvatnsins við austanvert Mývatn í tíma og rúmi.

Í Auðnavík syðst í Ytriflóa eru afar skörp skil milli kalda grunnvatnsins úr suðri og þess volga úr austri og norðaustri (myndir 1 og 2). Sunnan við skilin er lindavatnið kalt en norðan þeirra gætir jarðhitaáhrifa. Í Kröflueldum varð landris allt að hálfum metra við norðanverðan Ytriflóa og þá færðust skilin milli kalda vatnsins og þess volga um ca. 200 m til suðurs (Jón Ólafsson, 1991). Jafnframt hitnaði grunnvatnið verulega norðan við skilin. Til eru mælingar á vatnshita í lindum fyrir umbrotahrinu Kröfluelda og haustið 1978 mældist til dæmis hiti í einstökum lindum við Ytriflóa allt að 18°C hærri en verið hafði fyrir umbrotin. Þá fylgdi kvikuhlaupum gliðnun á sprungunum austan við Mývatn. Í kjölfarið leitaði (kaldi) grunnvatnsstraumurinn úr suðri tímabundið lengra til norðurs og að Bjarnarflagi. Við það lyftist hlýrra (og léttara) vatn upp á við og það hitaði grunnvatnið á svæðinu. Þetta vatn skilar sér til Ytriflóa og þar kom hitnunin strax fram, eins og sýnt er á mynd 2. Jafnframt urðu breytingar á efnainnihaldi vatnsins, eins og fjallað er um í 3. kafla. Þetta má einnig sjá á myndum 3 og 4 sem sýna hita og kísilstyrk í lind 13 syðst í Auðnavík og í Stórugjá. Í lind 13 í Auðnavík var hitamælt mánaðarlega á árunum 1976 til 1980 og sýni til efnagreininga voru tekin nokkuð reglulega (Þóroddur F. Þóroddsson, 1980).



Mynd 3. Lind 13 í Auðnavík í Vogaflóa. Myndin sýnir hitastig (rauð tákn, vinstra megin) og styrk kísils (græn tákn, hægra megin). Hitinn í lindinni hækkaði úr um 5°C fyrir Kröfluelda og í um 12°C í kjölfar kvikuhlaups 1977. Á sama tíma hækkaði styrkur kísils úr um 20 mg/L í um 70 mg/L. Um mitt ár 1980 var lindin komin á þurrt vegna landriss (Þóroddur F Þóroddsson, 1980 og gagnasafn ÍSOR).



Mynd 4. Stóragjá. Myndin sýnir hitastig og kísilstyrk frá 1974 og fram yfir 2000 og þær breytingar sem urðu á báðum þessum þáttum í Kröflueldum.

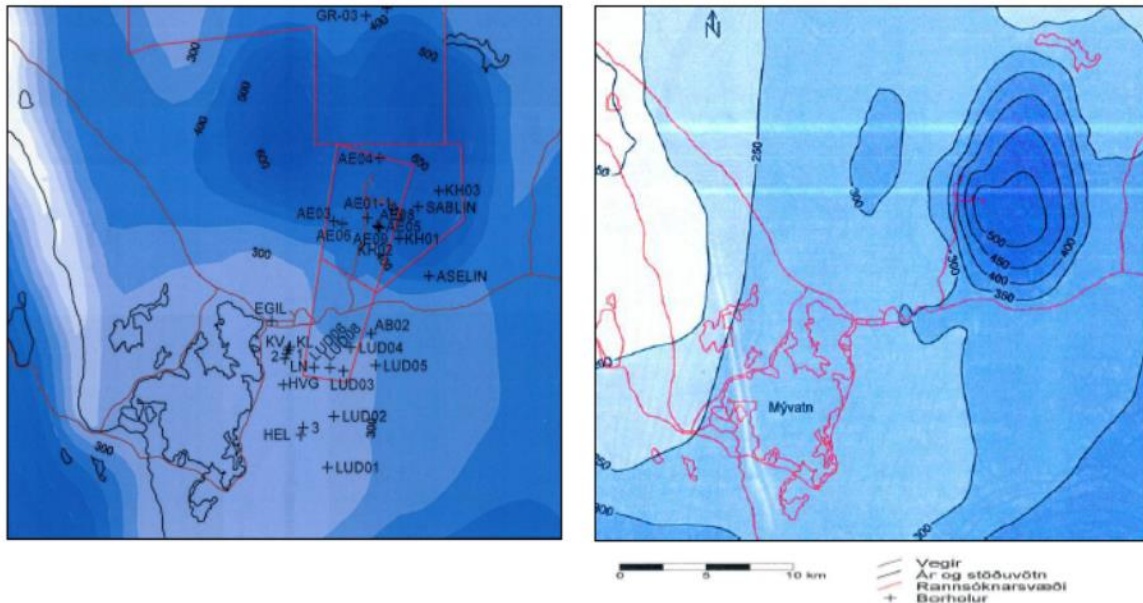
Allt frá árinu 1980 hafa verið gerðar ítarlegar rannsóknir til að kanna sem best rennslisleiðir vatns frá niðurrennslisstöðum affallsvatns frá orkuverunum í Bjarnarflagi og Kröflu, auk reglubundins eftirlits með efnasamsetningu grunnvatnsins. Samandregnar niðurstöður þeirra rannsókna eru að kalt grunnvatnsstreymi sé mikið og að mikil þýnning verði á jarðhitavatninu sem blandast því. Hluti þess vatns sem sígur niður á Bjarnarflagssvæðinu fer til vesturs í átt að Mývatni og annar hluti til suðurs eftir gjám. Verður nánar fjallað um þessar rannsóknir hér á eftir.

2.2 Líkanreikningar

Árið 1999 var birt grunnvatnslíkan af vatnasvæði Mývatns (Verkfræðistofan Vatnaskil, 1999). Þetta líkan hefur síðan verið uppfært og útvíkkað samhliða gerð grunnvatnslíkans af Norðausturlandi (Verkfræðistofan Vatnaskil, 2008). Slíkir líkanreikningar byggjast á mælingum á úrkomu, afrennsli, vatnsstöðu þar sem við verður komið og margs konar mælingum öðrum, ekki síst á breytingum á grunnvatnshæð, eins og áður var að vikið.

Grunnvatnslíkanreikningarnir sem gerðir voru sérstaklega fyrir Mývatnssvæðið sýndu ágæta mynd af rennslisháttum grunnvatnsins út í vatnið. Upphafsgerð líkansins var helst gagnrýnd fyrir líklega bjögun á Kröflusvæðinu sem er í norðausturhorni líkansvæðisins. Þessi atriði vörðuðu fyrst og fremst það að þar þótti vanta beinar mælingar á grunnvatnsstöðu (Kristján Sæmundsson og Þórólfur H. Hafstað, 2007). Til þess að stilla líkanið af þarf að auki skýra mynd af vatnsleiðnieiginleikum jarðlaga á svæðinu og misleitni í þeim (anisotropy). Þessar upplýsingar þurfa að vera þekktar allt umhverfis hið eiginlega líkansvæði ef vel á að vera.

Úr þessu var bætt þegar reiknilíkanið var víkkað út og látið spanna Norðurgosbeltið eða svæðið milli Skjálfandafljóts og Jökulsár á Fjöllum (Verkfræðistofan Vatnaskil, 2008). Þá hafði allmörgum mælingaholum við Kröflu, í Gjástykki og á Þeistareykjum verið bætt í þann gagnagrunn sem reiknilíkonin byggjast á og enn fremur tekið tillit til lindasvæða víðs vegar á hálendinu og allt norður í Öxarfjörð. Í ljós kom verulegur munur á mældri og reiknaðri grunnvatnshæð, einkum á svæðinu norðan Mývatns. Þessi breyting á grunnvatnslíkaninu er sýnd á mynd 5. Hvað varðar grunnvatnsrennsli til Mývatns breyttist heildarmyndin ekki mikið utan að nýjar mælingar sýndu mun meira aðrennsli til Ytriflóa en áður hafði verið reiknað með. Þetta byggði að nokkru á mati á mælingum á útrennslinu úr vatninu.



Mynd 5. Munur á grunnvatnshæð í reiknilíkönum Vatnaskila frá 1999 (hægra megin) og 2008 (til vinstri). Breytingin er fyrst og fremst á svæðinu norðan Mývatns og orsakar það að töluvert meira vatn reiknast nú renna til Ytriflóa en áður var talið.

Fyrstu áætlanir um heildarinnrennsli í Ytriflóa gerðu ráð fyrir um $7 \text{ m}^3/\text{s}$ (Jón Ólafsson, 1991). Það byggðist meðal annars á beinum mælingum í Teigasundi úti í vatninu sjálfu sem og efnagreiningum. Þá var áætlað að vatnsskipti í Mývatni tækju um það bil mánuð og að vatnsskiptin í Ytriflóa 14–19 daga.

Grunnvatnslíkanið fyrir Mývatn (1999) gerði ráð fyrir töluvert meira rennsli í Ytriflóa en fyrr hafði verið talið, eða $8,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Þá var vitað af líklegri bjögun vegna misræmis á grunnvatnshæð á Kröflusvæðinu. Endurbætur og ekki síst útvíkkun reiknilíkansins (2008) sýndu að innrennslið í Ytriflóa er um $11 \text{ m}^3/\text{s}$.

Spyrja má hvort þessi síðasta niðurstaða um rennsli í Ytriflóa sé nokkuð nær lagi en hinar fyrri. Því er til að svara að hún er fengin með því að skoða Norðausturgosbeltið sem heild og fellur ágætlega að þeirri heildarmynd. Þess vegna er talið að niðurstaðan sé nærri réttu lagi.

Þarna er umtalsverður munur miðað við fyrri áætlanir og mætti ætla að vatnsskipti í Ytriflóa taki styttri tíma sem þessu nemur. Einnig mætti ætla að hlutur náttúrulegs jarðhitavats sé öllu meiri en oftast hefur verið gert ráð fyrir þar sem reiknað er með blöndun kalda grunnvatnsins við heitt og efnaríkt vatn.

3 Vöktun grunnvatns

Efnasamsetning og hitastig grunnvatns við austanvert Mývatn hefur verið vaktað með einum eða öðrum hætti um áratuga skeið. Verður hér gerð grein fyrir helstu breytingum sem hafa átt sé stað í tímans rás. Sérstök áhersla er lögð á efnafræðilegar breytingar sem hafa orðið á því.

3.1 Náttúrulegar breytingar

Á fáum stöðum hér á landi hafa orðið meiri breytingar á grunnvatni af náttúrunnar völdum en við austanvert Mývatns. Breytingar þessar má rekja áratugi og aldir aftur í tímann og tengjast eldvirkni og umbrotum í sprungusveimnum sem kenndur er við Kröflu. Hér verður lítillega sagt frá breytingum í tengslum við Mývatnselda 1724 til 1729 annars vegar og síðan verða raktar stuttlega breytingar sem urðu við Kröfluelda 1975 til 1984.

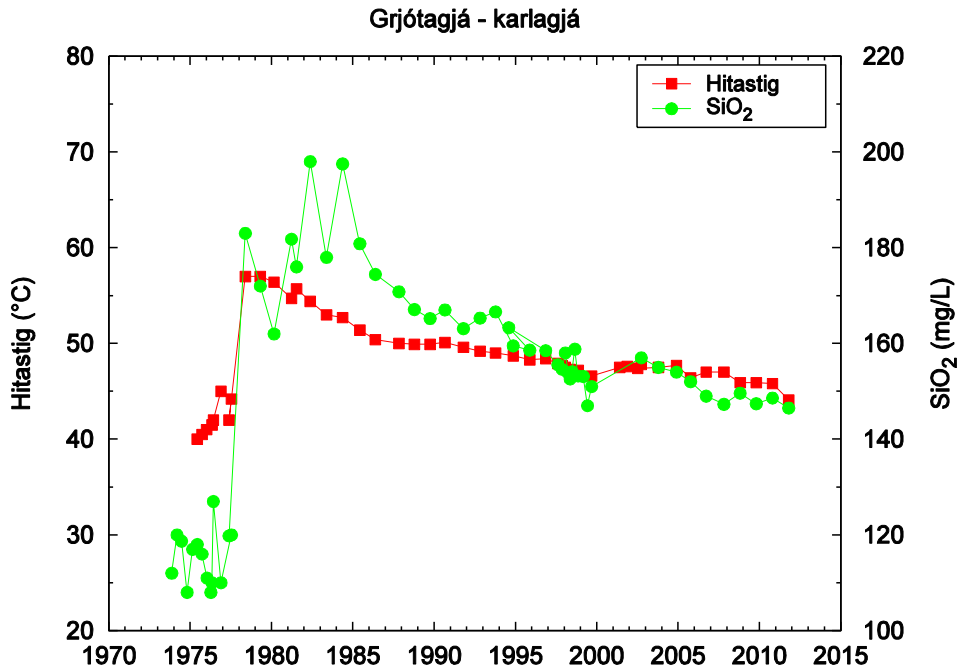
Mývatnseldar hófust vorið 1724 og stóðu með hléum fram til 1729. Þá hefur lítið gos sem varð 1746 oft verið talið hluti þeirra. Margt bendir til að Mývatnseldar hafi verið með svipuðu móti og Kröflueldar. Þeir hófust reyndar með sprengigosi þegar Víti myndaðist en einkenndust annars af sprungugosum og hraunflæði og þá er líklegt að samfara þeim hafi verið kvikuinnskot neðanjarðar. Miklar breytingar urðu við Mývatn, land reis, hraun rann í norðurenda þess, en sprunguhreyfingar og hraungos urðu í Bjarnarflagi. Tveir bæir eyddust alveg og Reykjahlíð tímabundið. Mývatn grynnaði og var því kennt um að silungsveiði lagðist nánast af. Upplýsingar um breytingar á grunnvatni eru ekki miklar en fram kemur í samtímalýsingu að hiti vatns hafi hækkað mikið við Reykjahlíð:

Hiti yfirmáta mikill er kominn hér í jörðina nærri bænum Reykjahlíð allt ofan í vatn; einn sífeldur reykur og svæla útgengur af jarðarinnar hólum og gryffum hvað með því daglega er í aukningu að fara, óttast menn fyrir að ei muni langt að biða einhvorrar verkunar ekki minni en áður hefur undan gengið. (Jón Sæmundsson, prestur) (Þorvaldur Thoroddsen, 1907–1915, bls. 391).

Af þessu má draga þá ályktun að hiti grunnvatns við austanvert Mývatn hafi breyst töluvert í Mývatnseldum og efnasamsetning vatnsins einnig. Vel má vera að breytingarnar hafi verið enn meiri en í Kröflueldum þar sem virkni Mývatnselda var sunnar í Kröflusprungusveimnum en í Kröflueldum og áhrifa þeirra gætti enn meir í Mývatnssveit vegna tíðra kvikuhlaupa til suðurs (Kristján Sæmundsson, 1991).

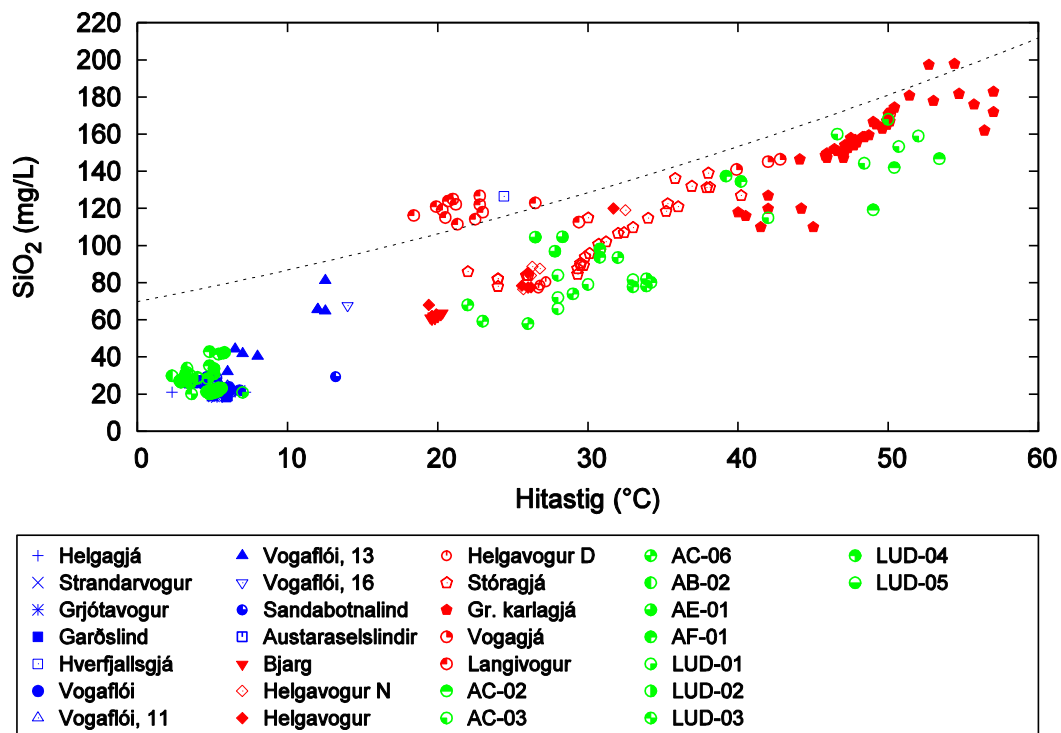
Í Kröflueldum 1975 til 1984 voru sprunguhreyfingar nokkurn veginn á sömu spildu og í Mývatnseldum og gosin voru sum nánast á sömu sprungum en þá voru kvikuhlaupin flest til norðurs. Landbreytingar í Bjarnarflagi og við austanvert Mývatn voru miklar. Land lyftist og Mývatn grynnaði. Hveravirkni í Bjarnarflagi jókst, grunnvatn hitnaði og efnasamsetning þess breyttist. Mestar urðu breytingarnar í kjölfar tveggja kvikuhlaupa 1977. Það fyrra varð í apríl og virðist hafa verið lítið og haft lítil en þó einhver áhrif en það seinna í september. Var það mjög afdrifarikt og olli flestum þeim breytingum á grunnvatni sem fjallað er um í skýrslu þessari. Þá gaus t.d. gjalli upp um eina af borholunum í Bjarnarflagi. Einnig urðu lítils háttar breytingar samfara kvikuhlaupi 1980. Um hitabreytingar í grunnvatninu var fjallað nánar í kafla 2.

Ágætt dæmi um breytingar í hita og efnasamsetningu grunnvatns við austanvert Mývatn má sjá á mynd 6, sem sýnir hita og styrk kísils (SiO_2) í vatni í Grjótagjá allt frá því fyrir Kröfluelda og til dagsins í dag. Þar sést að hiti vatnsins hækkaði úr um 40°C í tæplega 60°C í kvikuhlaupi 1977 og styrkur kísils hækkaði úr um 110 mg/L í um og yfir tæplega 200 mg/L á sama tíma. Myndin sýnir einnig að enn í dag gætir áhrifa frá þessum breytingum í Grjótagjá. Til viðbótar þeim mælingum sem sýndar eru á mynd 6 má nefna að þann 8. ágúst 1949 mældi Baldur Línadal hita og efnagreindi kísil í sýni úr Grjótagjá. Niðurstöður hans voru þær að hitinn mældist 42°C og kísilstyrkur 111 mg/L , sem er í góðu samræmi við vatnið í Grjótagjá á árunum fyrir kvikuhlaupin 1977 (Baldur Línadal, 1958).



Mynd 6. Mældur hiti vatns og styrkur kísils (SiO_2) í Grjótagjá (karla) 1973–2012.

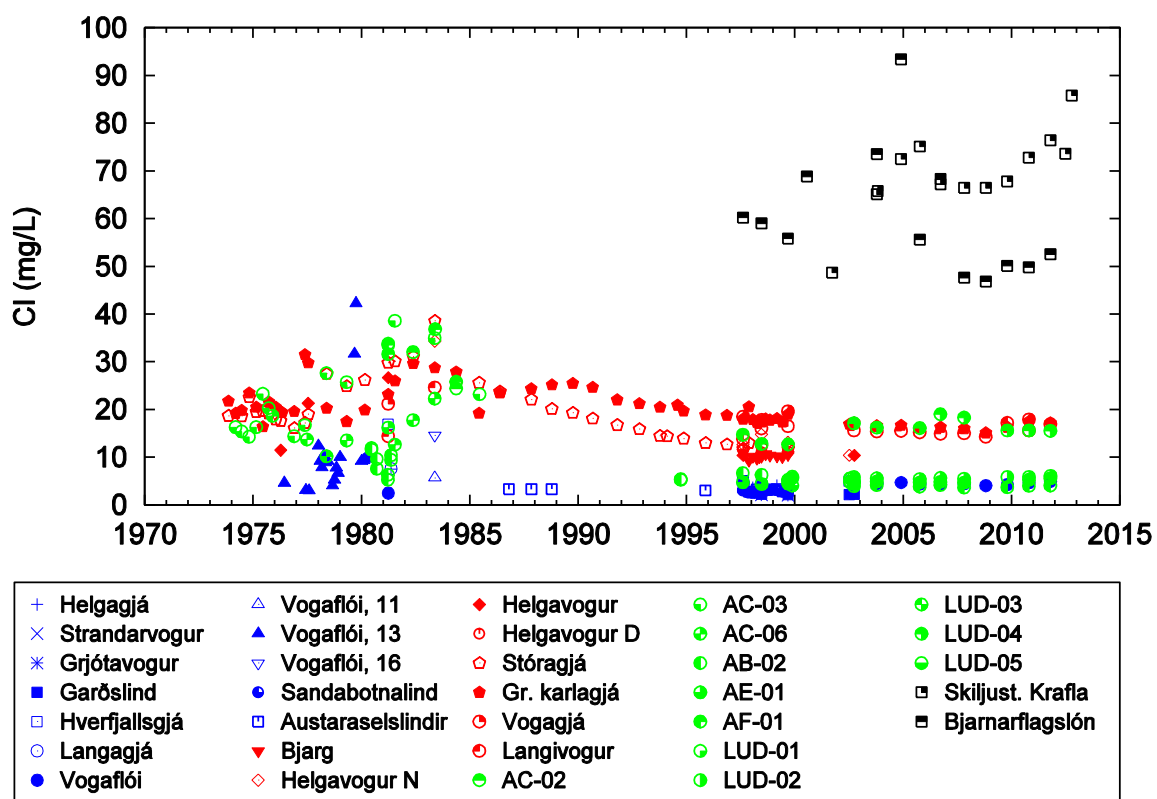
Á mynd 7 sést vel að styrkur kísils hækkar þegar hitastig vatnsins hækkar, eða með öðrum orðum er góð fylgni milli hita vatns og kísilstyrks þess. Er þetta grundvöllur að kísil-hitamælum sem notaðir eru í jarðefnafræði til að segja til um hita vatns í jarðhitakerfum á grundvelli kísilstyrks í laugum og hverum á yfirborði.



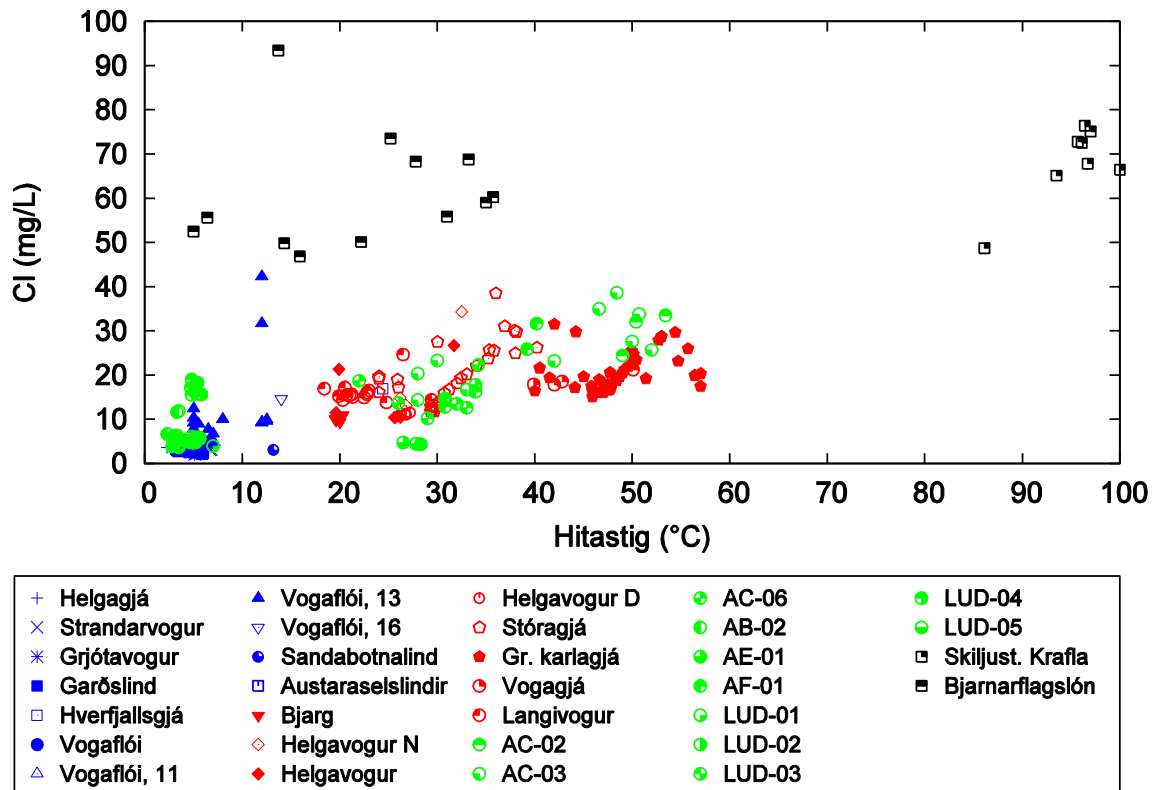
Mynd 7. Samband hita vatns og kísilstyrks í grunnvatni í Mývatnssveit. Brotalína sýnir mettunarstyrk myndlauss kísils.

Yfirlit um sýnatöku- og mælingastaði sem fjallað er um í skýrslunni er sýnt á mynd 19.

Á myndum 8 og 9 er sýndur klóríðstyrkur (Cl) í grunnvatni og affallsvatni, annars vegar hvernig styrkur hans hefur þróast í tímans rás frá 1974 fram til dagsins í dag (mynd 8) og hins vegar hvernig sambandinu á milli klóríðstyrks og hitastigs er háttað (mynd 9). Þar sést glögggt að klóríðstyrkurinn fylgir hitastigi, þ.e. að eftir því sem hitastig vatnsins er hærra þeim mun hærri er klóríðstyrkur og hæstur í affallsvatni virkjananna. Hafa verður í huga varðandi sýnin úr Bjarnarflagslóni, þ.e. affallsvatni Bjarnarflagsvirkjunar, að sýnatöku- staðurinn er í vesturenda lónsins en losun frá virkjuninni er í austurenda þess. Vatnið hefur því kólnað umtalsvert áður en sýnin eru tekin. Hitastig affallsvatns virkjunarinnar er 90–100°C þar sem það er losað í lónið. Á mynd 8 má einnig sjá að losun jarðhitavatsins (affallsvatnsins) virðist ekki hafa haft áhrif til hækkunar á styrk klóríðs í grunnvatninu þegar rýnt er í klóríðgreiningar t.d. frá Grjótagjá, Langavogi og Vogaflóa.

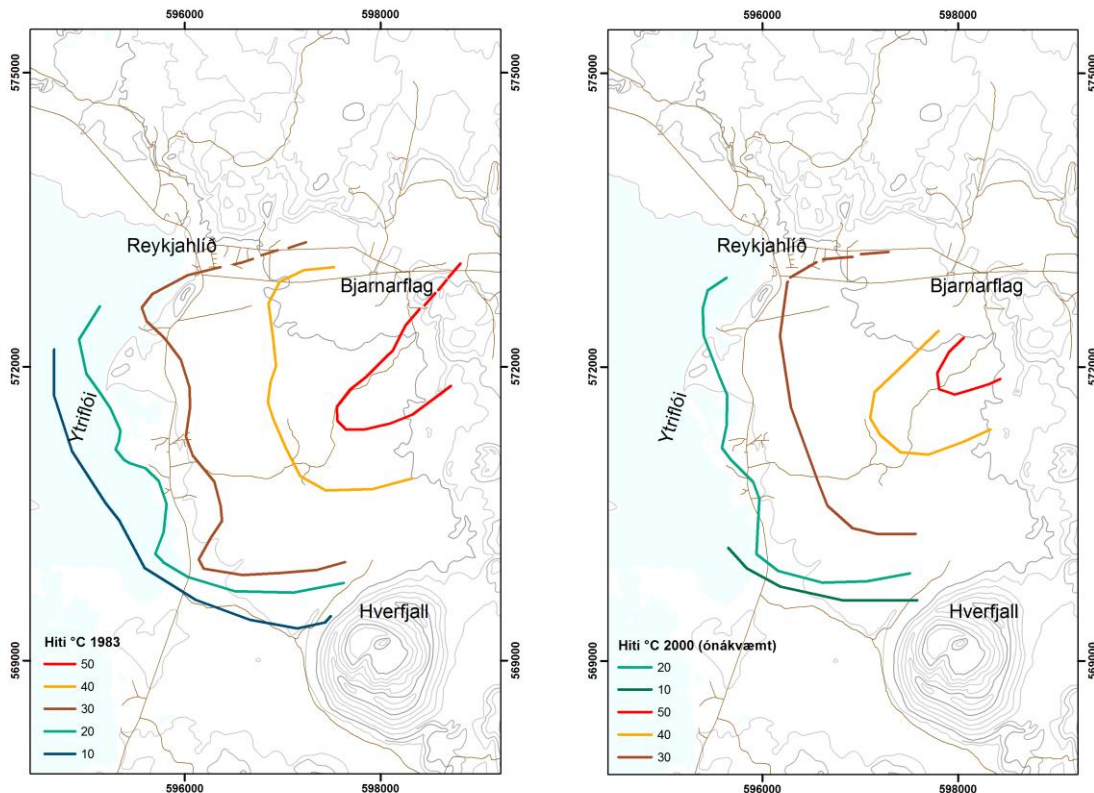


Mynd 8. Styrkur klóríðs í grunnvatni við austanvert Mývatn og í affallsvatni frá orkuverum í Bjarnarflagi og Kröflu (svörtu táknin). AC-holur eru sk. Kísiliðjuholur í Bjarnarflagi og LUD holur eru eftirlitsholur austan Námafjalls.



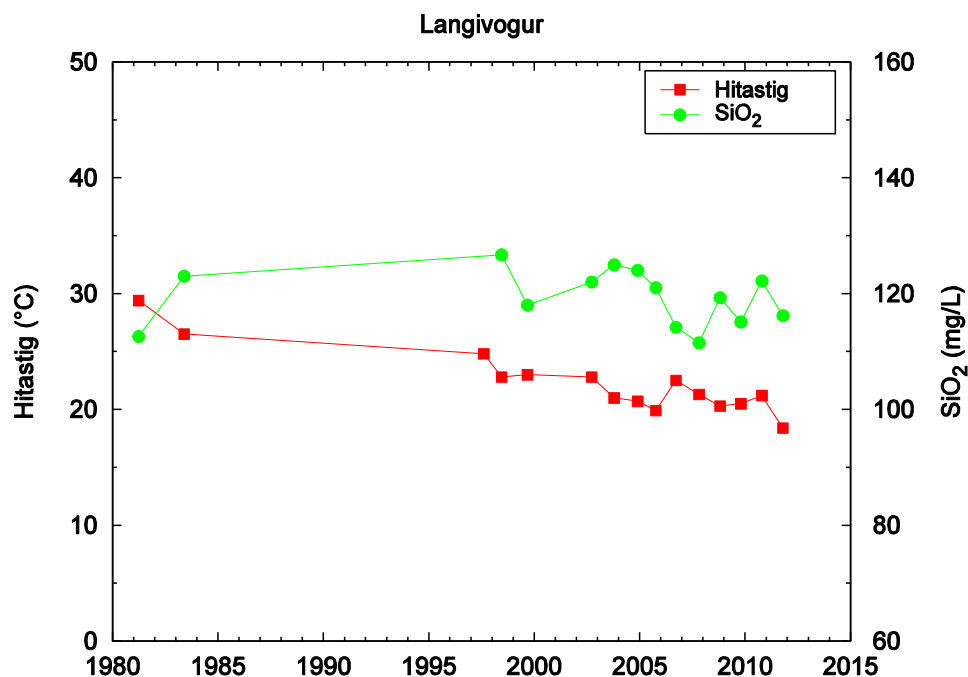
Mynd 9. Styrkur klóríðs og hiti grunnvatns við austanvert Mývatn og affallsvatns frá orkuverum í Bjarnarflagi og Kröflu (svörtu táknin).

Fram hefur komið að í Kröflueldum varð veruleg breyting á hita og efnasamsetningu grunnvatns við austanvert Mývatn. Sumarið 1983 voru gerðar hitamælingar víðs vegar á svæðinu og dregið upp kort með jafnhitalínum í grunnvatninu (de Zeeuw og Gíslason, 1988). Kort þeirra hefur verið endurteiknað á einfaldan hátt og er sýnt á mynd 10. Þar kemur fram að 1983 fylgdi 20°C jafnhitalínan nokkuð austurströnd Vogaflóa og að 30°C línan lá skammt austan þjóðvegarins. Reynt hefur verið að draga upp sambærilegt kort fyrir árið 2000 (einnig sýnt á mynd 10) en á grunni mjög takmarkaðra mælinga. Þá kemur fram að jafnhitalínurnar hafa allar hliðrast eða færst til austurs til samræmis við kólnun grunnvatnsins.



Mynd 10. Jafnhitalínur í grunnvatni við austanvert Mývatn í maí 1983 (byggt á de Zeeuw og Gíslason, 1988) og árið 2000 (ónákvæmt, byggt á gögnum ÍSOR og LV).

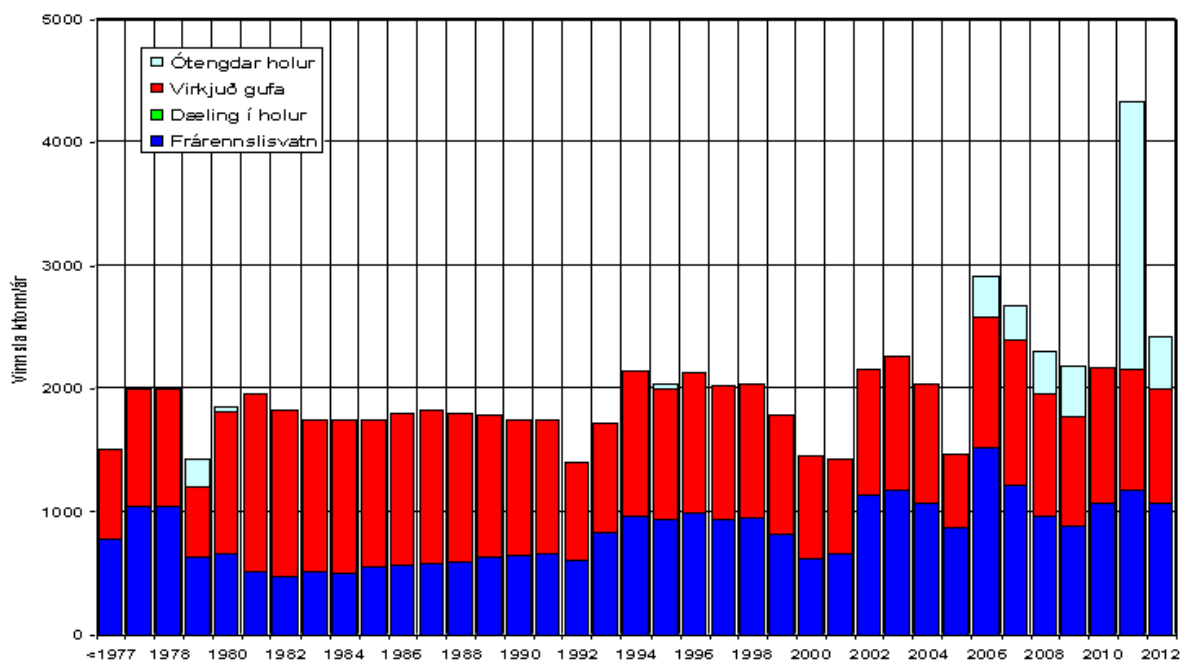
Kólnun grunnvatnsins má einnig sjá á mynd 11 sem sýnir hita og kísilstyrk í Langavogi. Myndin sýnir að hitastig vatnsins hefur lækkað um u.þ.b. 5°C frá 1980. Styrkbreytingar í kísli svara hitabreytingu í átt til kólnunar hægar en þegar vatn hitnar og eru óverulegar.



Mynd 11. Hiti vatns og styrkur kísils í Langavogi, 1980–2012.

3.2 Vöktun grunnvatns

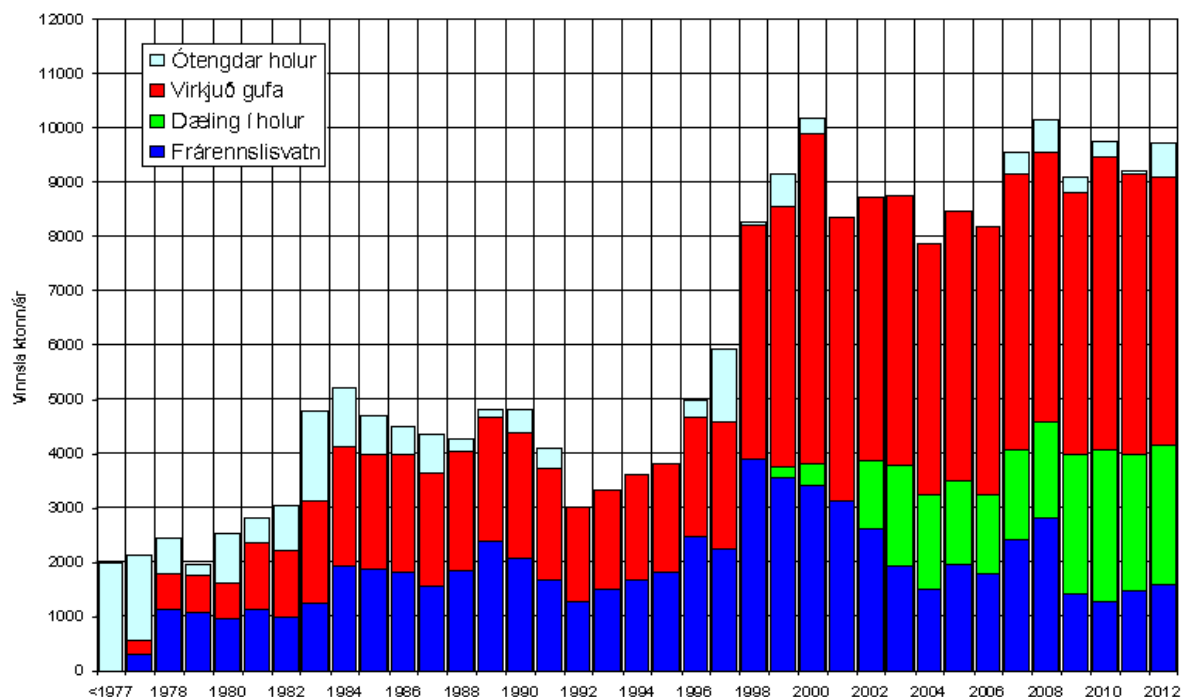
Affallsvatni frá virkjun í Bjarnarflagi og frá blásandi borholum hefur alla tíð verið fargað í opnar sprungur á yfirborði þar sem það blandast í grunnvatn. Um langa hríð hefur þessi förgun átt sér stað í Bjarnarflagslóni, þar sem vatnið hverfur niður í gjá vestast í lóninu. Magn affallsvatns hefur ekki verið mælt en út frá vinnslu úr jarðhitakerfinu, varmainnihaldi vökvans og fleiri þáttum má áætla hversu mikið það er og eru niðurstöður sýndar á mynd 12 fyrir árabilið 1977 til 2012 (Trausti Hauksson, 2013). Þar sést að magn þetta hefur verið nokkuð breytilegt, en ekki fjarri 1000 ktonn á ári, að undanskildu árabilinu 1979 til 1993 þegar aðeins var fargað um 500–700 ktonnum á ári. Meðallosun á tímabilinu reiknast um 830 ktonn á ári. Magn þess affallsvatns sem til fellur frá rekstri gufuorkuvers hverju sinni er mjög háð vermi (enþalpiu) þeirra holna sem nýttar eru. Vermi holna hækkar með hækkandi hita þeirra og jafnframt lækkar hlutfallslegt magn affallsvatns en gufumagnið eykst. Fyrstu holurnar í Bjarnarflagi voru tiltölulega grunnar og „kaldar“ miðað við nýrri og dýpri holur. Af þessu leiðir að minna magn affallsvatns mun falla til fyrir hvert framleitt MW af rafmagni í áformaðri virkjun í Bjarnarflagi en í gömlu og litlu rafstöðinni sem rekin hefur verið frá 1969. Auk þess verður nýtni gufunnar mun meiri í nýrri virkjun en gömlu rafstöðinni.



Mynd 12. Affallsvatni frá Bjarnarflagsvirkjun og blásandi borholum er fargað í gjár og sprungur á yfirborði. Myndin sýnir heildarvinnslu úr jarðhitakerfinu í kílótonnum (ktonn). Bláar súlur sýna magn affallsvatns, rauðar virkjaða gufu og ljósbláar óvirkjaðar holur (Trausti Hauksson, 2013).

Affallsvatni frá Kröfluvirkjun er fargað á tvennan hátt. Annars vegar er því dælt í niðurrennslisholu, mest í holu 26 þar sem það blandast út í jarðhitageyminn á um 2000 m dýpi. Hins vegar er hluta þess fargað í Hlíðardalslæk (Dallæk) en í hann rennur einnig allt náttúrulegt afrennsli á jarðhitasvæðinu í Kröflu og hefur gert frá ómunatíð. Mynd 13 sýnir yfirlit um magn affallsvatns frá Kröfluvirkjun og hvernig því hefur verið fargað allt frá árinu 1977 þegar virkjunin var tekin í notkun og fram til 2011. Myndin sýnir einnig magn

virkjaðrar gufu og gufu frá ótengdum borholum. Á myndinni má sjá að niðurrennsli í borholur hófst 1999 og á síðustu þremur árum hefur frárennsli frá virkjuninni í Hlíðardalslæk verið tæplega 1500 ktonn á ári en að jafnaði fyrir tímabilið um 1830 ktonn/ári.



Mynd 13. Affallsvatni frá Kröfluvirkjun er fargað með tvennum hætti. Annars vegar er því dælt niður í borholur í Kröflu og hins vegar fer hluti þess í Hlíðardalslæk. Myndin sýnir magn affallsvatns sem dælt er í borholur annars vegar (grænar súlur) og rennur í Hlíðardalslæk hins vegar (bláar súlur). Rauðar súlur sýna virkjaða gufu og ljósbláar óvirkjaðar holur (Trausti Hauksson, 2013).

Segja má að reglubundin vöktun grunnvatns í Mývatnssveit á vegum Landsvirkjunar, vegna eftirlits með affallsvatni frá jarðhitánytingu í Kröflu og Bjarnarflagi, hafi hafist haustið 2003 (Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson, 2004). Var þar byggt á tillögum sem settar voru fram í skýrslum Orkustofnunar 2002 og 2003 (Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson, 2002; Halldór Ármannsson, 2003) og samþykktar af Umhverfisstofnun. Fyrir þennan tíma er til allnokkuð af upplýsingum um hita og efnasamsetningu grunnvatns, jafnvel styrk snefilefna, í efnagrunni ÍSOR, m.a. vegna ýmissa sérverkefna sem unnin voru fyrir Landsvirkjun. Eftirlit með efnasamsetningu grunnvatnsins síðastliðinn áratug hefur verið fólgið í því að sýni til svokallaðrar heildarefnagreiningar eru tekin einu sinni á ári og sýni til snefilefnagreiningar einu sinni á ári á eftirfarandi tíu stöðum: Frárennsli skiljustöðvar í Kröflu, Hlíðardalslæk við holu AB-2, borholur AB-2, LUD-2, LUD-3 og LUD-4 í Búrfells-hrauni, niðurrennsli úr Bjarnarflagslóni, Grjótagjá, lindir í Vogafloa og Langavogi. Í skýrslunni er notað heitið Búrfellshraun yfir hraun austan og sunnan við Námafjall, þótt vitað sé að þar er ekki rétt farið með örnefni. Orðanotkunin hefur verið með þessum hætti í t.d. eftirlitsskýrslum með grunnvatni undanfarin ár. Aðaláhersla hefur verið lögð á að fylgjast með styrk arsens (As), einnig áls upp á síðkastið, og hefur niðurstöðum verið skilað í árlegum eftirlitsskýrslum (Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson 2012; og heimildir þar).

Hér á eftir verður verður fjallað sérstaklega um arsen enda hefur lengur verið fylgst með því og að auki sýnir það nokkuð sömu mynd og ál.

Umhverfismörk fyrir arsen eru tilgreind í reglugerð nr. 796/1999 um varnir gegn mengun vatns. Þar eru uppgefin umhverfismörk nokkurra málma og þeim skipt í fimm flokka, I til V eins og sýnt er í töflu 1. Fyrir arsen eru umhverfismörk I (mjög lítil eða engin hættu á áhrifum) 0,0004 mg/L en umhverfismörk II eru 0,0004–0,005 mg/L (lítil hættu á áhrifum) (sjá nánar í töflu 1). Í reglugerð um neysluvatn nr. 536/2001 er hámarksgildi fyrir arsen upp gefið 0,01 mg/L.

Tafla 1. Umhverfismörk fyrir málma í yfirborðsvatni til verndar lífríki (styrkur efna í mg/L).

Umhverfismörk	I	II	III	IV	V
Kopar	≤0,0005	0,0005-3	0,003-0,009	0,009-0,045	>0,045
Zink	≤0,005	0,005-0,02	0,02-0,06	0,06-0,3	>0,3
Kadmíum	≤0,00001	0,00001-0,0001	0,0001-0,0003	0,0003-1,005	>1,005
Blý	≤0,0002	0,0002-0,001	0,001-0,003	0,003-0,015	>0,015
Króm	≤0,0003	0,0003-0,005	0,005-0,015	0,015-0,075	>0,075
Nikkel	≤0,0007	0,0007-0,0015	0,0015-0,0045	0,0045-0,0225	>0,0225
Arsen	≤0,0004	0,0004-0,005	0,005-0,015	0,015-0,075	>0,075

Skýringar við töflu 1:

Umhverfismörk I: Mjög lítil eða engin hættu á áhrifum.

Umhverfismörk II: Lítil hættu á áhrifum.

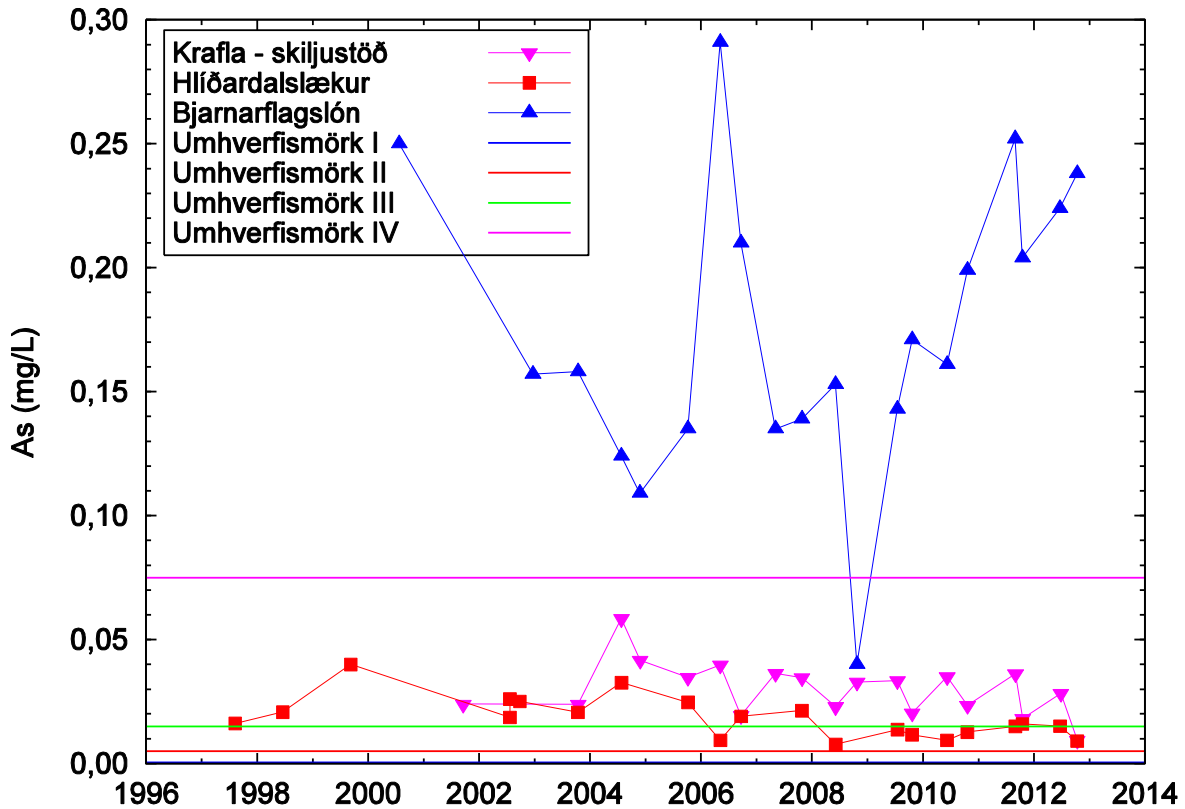
Umhverfismörk III: Áhrifa að vænta á viðkvæmt lífríki.

Umhverfismörk IV: Áhrifa að vænta.

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

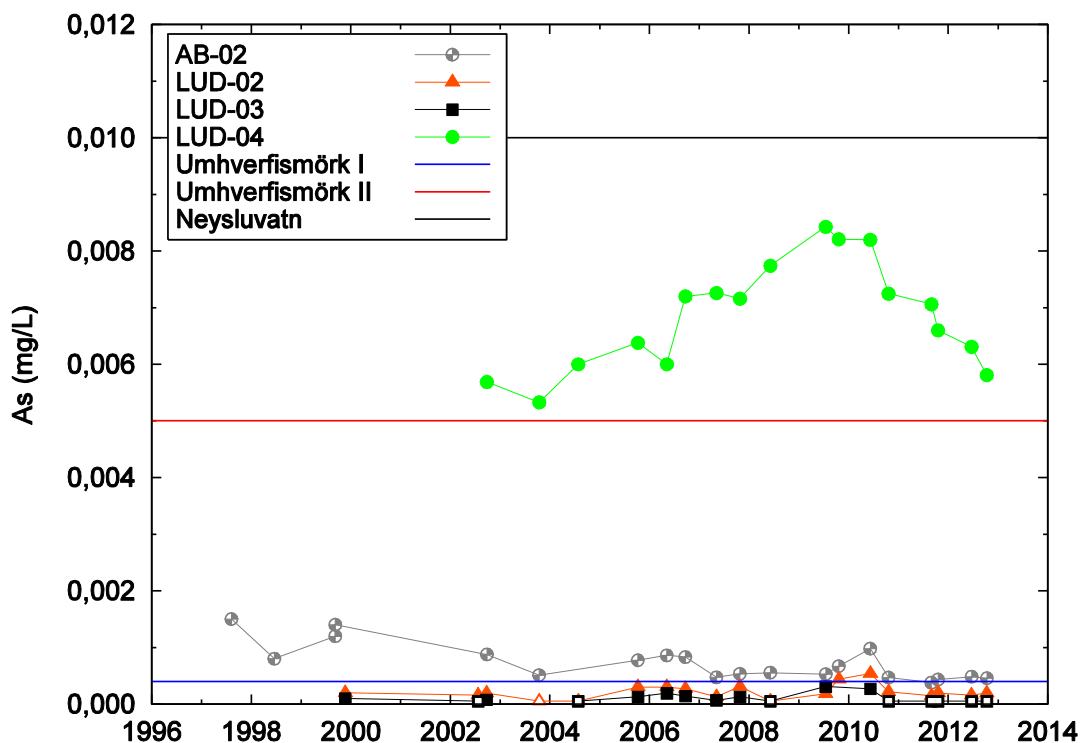
Niðurstöður mælinga á arseni á ofangreindum tíu stöðum eru sýndar í þrennu lagi á myndum 13, 14 og 15 og er það gert í þeim tilgangi að myndirnar, eða öllu heldur niðurstöður mælinganna, verði læsilegri vegna þess hve mikill munur er á styrk arsens í vatninu. Myndirnar sýna einnig umhverfismörk eins og þau eru tilgreind í reglugerð nr. 796/1999.

Mynd 14 sýnir niðurstöður arsenmælinga fyrir affallsvatn frá virkjununum í Kröflu og Bjarnarflagi, og fyrir Hlíðardalslæk sunnan þjóðveggar við holu AB-2. Á þessum stöðum er styrkur arsens hæstur og skalinn fyrir styrk arsens á myndinni spannar bilið frá 0–0,3 mg/L. Hér er rétt að nefna að styrkur arsens í vatni Hlíðardalslækjar fyrir virkjun í Kröflu er ekki þekktur en til lækjarins rennur allt náttúrulegt afrennsli af jarðhitasvæðinu eins og rakið var hér á undan.



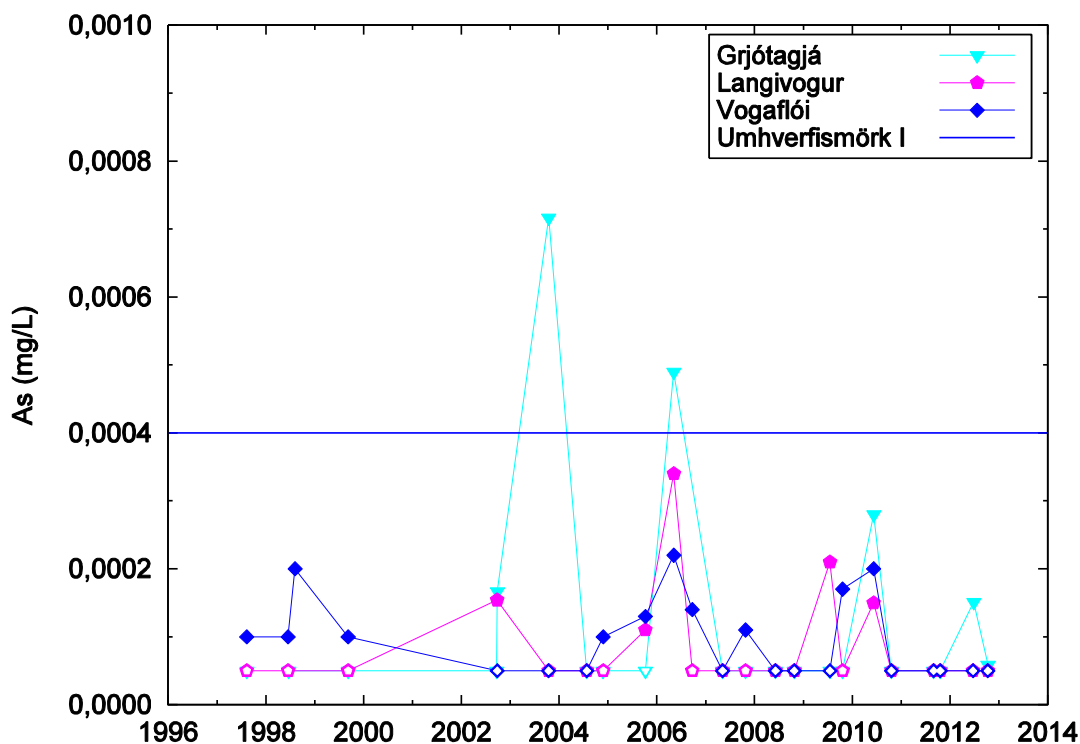
Mynd 14. Styrkur arsens í sýnum af affallsvatni frá Kröflu- og Bjarnarflagsvirkjunum og úr Hlíðardalslæk við holu AB-2 á árunum 1997–2012 ásamt umhverfismörkum I, II, III og IV (umhverfismörk I eru bláa grunnlínan neðst á myndinni).

Mynd 15 sýnir mælingar á styrk arsens í holum í Búrfellshrauni, AB-2 og LUD-2, LUD-3 og LUD-4. Umhverfismörk I og II eru einnig sýnd á myndinni ásamt hámarksgildi fyrir neysluvatn (0,01 mg/L). Á þessari mynd spannar skalinn yfir styrk arsens bilið frá 0–0,012 mg/L. Í holu LUD-4 er styrkur arsens rétt yfir umhverfismörkum II, hækkaði úr u.þ.b. 0,006 mg/L á árunum 2002 til 2004 í rétt um 0,008 mg/L um 2010 og hefur síðan lækkað í upphafsgildi um 0,006. Líklegt verður að telja að þessi breyting stafi af breytingum í því magni af affallsvatni sem farið hefur í Hlíðardalslækinn. Magn þess jókst nokkuð á árunum 2004 til 2008 en hefur minnkað frá þeim tíma eins og sjá má á mynd 13. Hámarksstyrkur arsens í neysluvatni er 0,01 mg/L, eins og sýnt er á mynd 14. Vatn á öllum tíu eftirlitsstöðunum, að frátöldu affallsvatni í Bjarnarflagslóni, Kröflustöð og í Hlíðardalslæk, hefur lægri arsenstyrk en hámark neysluvatnsstaðals segir til um.



Mynd 15. Styrkur arsens í vatni úr holum í Búrfellshrauni, AB-2 og LUD-2, LUD-3 og LUD-4 á árunum 1997–2012 ásamt umhverfismörkum I og II. Opin tákn: Sýni þar sem styrkur arsens er undir greiningarmörkum ($< 0,00005$ mg/L).

Mynd 16 sýnir síðan styrk arsens úr Grjótagjá, Langavogi og Vogafloa. Þessir staðir hafa lægstan styrk arsens og skalinn spannar bilið 0–0,001 mg/L. Umhverfismörk I eru sýnd á myndinni. Á þessari mynd og á mynd 15 sýna opin tákn niðurstöður þar sem styrkur mælist undir greiningarmörkum mæliaðferðarinnar. Nokkrir toppar koma fram á myndinni og er talið að í sýnatöku 2006 sé um að kenna mengaðri saltpéturssýru sem notuð var til að sýra sýnin. Vitað er um eina mælingu á styrk arsens í vatni úr Grjótagjá fyrir þann tíma sem mynd 16 sýnir. Árið 1976 tók Jón Ólafsson (1979b) sýni þar og greindi m.a. nokkur snefilefni og mældist styrkur arsens þá 0,0112 mg/L.



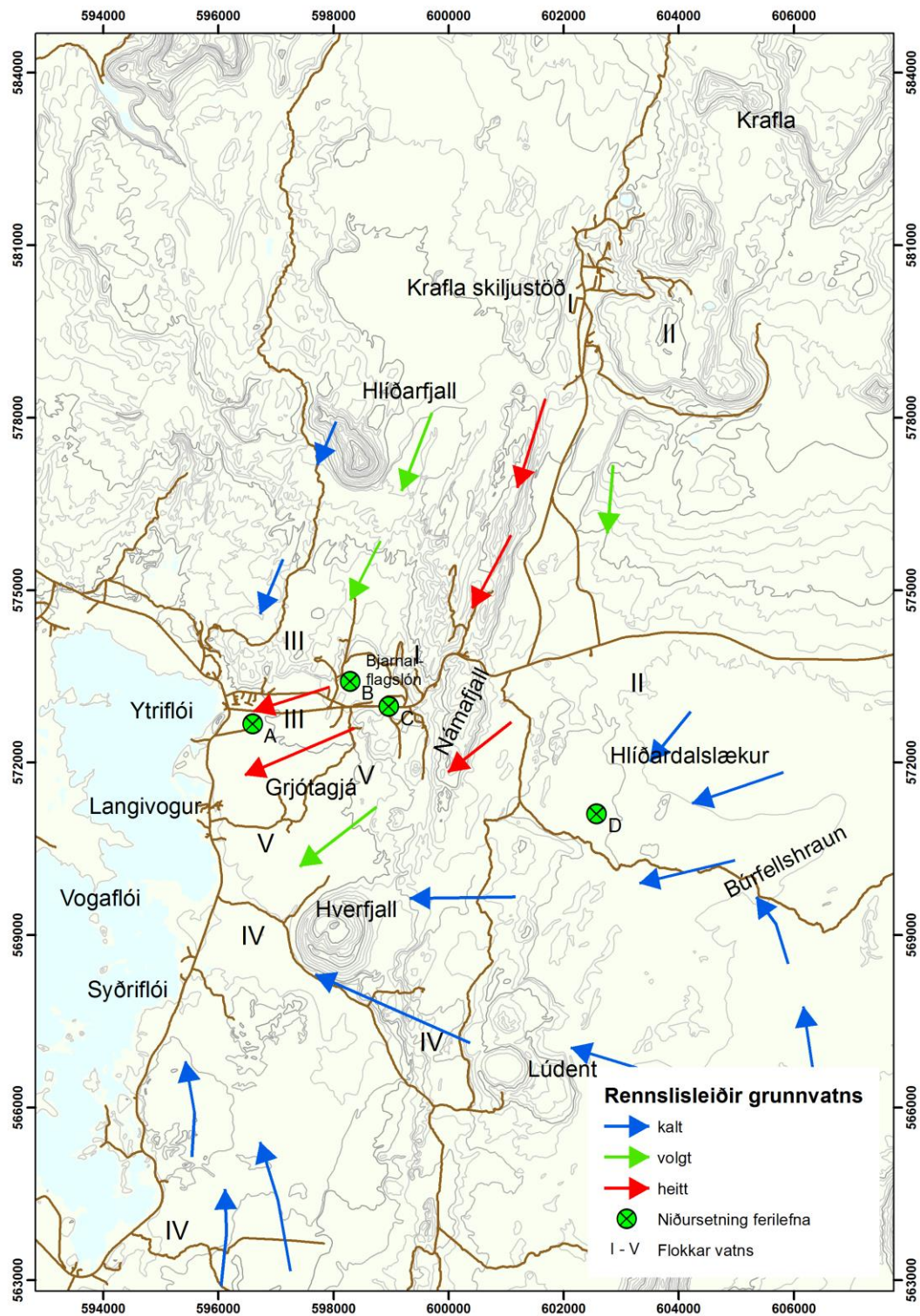
Mynd 16. Styrkur arsens í lindum við Mývatn, úr Grjótagjá, Langavogi og Vogafloa, á árunum 1997–2012 ásamt umhverfismörkum I. Opín tákn: Sýni þar sem styrkur arsens er undir greiningarmörkum ($< 0,00005$ mg/L).

Á grunni þeirra gagna sem safnað er um vinnslu jarðhitavatns í Kröflu og Bjarnarflagi og efnagreininga á affallsvatni sem fargað er á yfirborði á hvorum stað, má reikna hve mikið af t.d. arseni fellur til á ári. Meðalstyrkur arsens í affallsvatni Bjarnarflagsvirkjunar á árunum 2000 til 2012 er um 0,18 mg/L og árlegt rennsli affallsvatns hefur verið um 830 ktonna á ári, eins og rakið var hér á undan. Á þessu tímabili hafa því fallið til um 150 kg af arseni á ári. Magn affallsvatns frá Kröfluvirkjun, sem fargað er á yfirborði, hefur verið nokkuð breytilegt á liðnum árum en ekki fjarri því að vera 1830 ktonn tonn á ári að jafnaði. Útreikningar sýna að meðalstyrkur arsens á árabílinu 2001 til 2012 er 0,03 mg/L og má þá reikna að á hverju ári falla til um 50 kg af arseni sem renna til Hlíðardalslækjar.

Niðurstaða vöktunar sem fram hefur farið á efnainnihaldi grunnvatns við austanvert Mývatn, þar sem affallsvatni Bjarnarflagsvirkjunar og að hluta til Kröfluvirkjunar er fargað á yfirborði, sýnir enga langtíma leitni í átt að hækkandi styrk arsens á eftirlitsstöðum. Af þessari vöktunarsögu má síðan draga þá ályktun að ekki sé ástæða til að búast við áhrifum af völdum affallsvökva á Mývatn af núverandi fyrirkomulagi og enn síður ef affallsvökva fyrirhugaðrar virkjunar í Bjarnarflagi verður dælt niður.

Auk vöktunar á efnasamsetningu grunnvatnsins, sem greint var frá hér á undan, hafa verið gerðar margar prófanir til að kanna og greina rennsli affallsvatns frá Kröflu og Bjarnarflagi og hvernig það blandast í grunnvatnið við austanvert Mývatn. Hefur þetta verið gert með svokölluðum ferilprófunum þar sem þekkt magn af efni sem ekki finnst í miklum mæli í grunnvatninu eða jarðhitavatninu hefur verið sett niður í gjár og sprungur eða borholur og fylgst með endurheimtum þess í lindum, laugum og borholum á svæðinu. Fyrsta prófun af þessu tagi var gerð 1980 og sú síðasta 2000 en frá 2002 hefur aðaláherslan verið lögð á að fylgjast

með styrk arsens (og áls) eins og lýst hefur verið hér. Bæði þessi efni eru í mjög lágum styrk í grunnvatni en miklu hærri í affallsvatni virkjananna. Niðursetningarstaðir ferilefna, A – D, eru sýndir á mynd 17 ásamt helstu rennslisleiðum grunnvatnsins. Myndin sýnir einnig grunnvatnsflokkana sex sem fjallað er um í næsta kafla. Yfirlit um þær ferilprófanir sem gerðar hafa verið til að kanna rennslisleiðir grunnvatns í Mývatnssveit er sýnt í töflu 2.



Mynd 17. Niðursetningarstaðir ferilefna (sjá töflu 2), grunnvatnsflokkar og helstu rennslisleiðir.

Tafla 2. Yfirlit um ferilprófanir í Mývatnssveit. Niðursetningarstaðir eru sýndir á mynd 17.

Ár	Ferilefni	Niðursetningarstaður	Fundarstaðir	Ályktun
1980 ¹⁾	Flúoróscein	Niðurrennsli frá Hlíðardalslæk í Búrfellshrauni, norðan D	AB-2	Rennsli skilar sér í borholu á um 40 dögum
1981 ²⁾	Flúoróscein	Dælustöð, Helgavogi, A	Lind, Helgavogi, e.t.v. óljós svörun Kálfstjörn, Langavogi	Rennsli frá dælustöð til Mývatns en mjög lítið sem ekkert þaðan til suðurs
1982 ²⁾	Flúoróscein	Affall frá Kísiliðjunni, B	Í holum Kísiliðjunnar, og marktæk svörun í Helgavogi en lítil sem engin annars staðar	Rennsli frá Kísiliðjunni til Mývatns en mjög lítið sem ekkert til suðurs
1998 ³⁾	Rhódamín WT	Niðurrennsli frá Bjarnarflagsslóni, C	Enginn	Ferilefni hentar ekki. Sennilega tiltölulega lítið rennsli og/eða mikil þynning áður en söfnunarstöðum er náð
1998 ³⁾	Flúoróscein	Niðurrennsli frá Hlíðardalslæk í Búrfellshrauni, nálægt D	Enginn	Sýnatökustaðir of langt frá niðursetningarstað
1998 ³⁾	Kalíumjoðíð	Niðurrennsli frá Bjarnarflagsslóni, C	Nokkrir staðir frá Bjargi að Garðslind fyrstu 6 daga. Á fáeinum öðrum með millibili þar til efnið fór að greinast í Grjótagjá 3-4 mánuðum eftir niðursetningu	Þessi ferilprófun er ekki talin ábyggileg en er þó höfð hér með í yfirlitinu.
1999 ³⁾	Flúoróscein	Niðurrennsli frá Bjarnarflagsslóni, C	Óljósir smápúlsar í Grjótagjá en lítið sem ekkert annars staðar	Hratt yfirborðsrennsli
2000 ⁴⁾	Kalíumjoðíð	Niðurrennsli frá Bjarnarflagsslóni, C	Grjótagjá í 100 milljónfaldri þynningu eftir um 2 mánuði og vottur í Vogagjá um mánuði síðar	Djúpt rennsli til Grjótagjár samfara mikilli þynningu?

¹⁾: Jón Ólafsson, pers. upplýs., 1980; ²⁾: Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson (1983) ³⁾: Hrefna Kristmannsdóttir o.fl. (1999); ⁴⁾: Hrefna Kristmannsdóttir o.fl. (2001).

Í stuttu máli skila þessar ferilprófanir þeim niðurstöðum að fram kom að nokkur straumur var frá affalli Kísiliðjunnar um neysluvatnsholur hennar til Helgavogs og e.t.v. mjög veikur straumur þaðan suður á bóginn til Kálfstjarnar. Þá koma fram merki um veikan straum frá niðurfalli Bjarnarflagsslóns til Grjótagjár og örlítill merki um sama straum nokkru sunnar, í

Vogagjá, en engin nær Mývatni. Vatn sem fer niður í niðurrennslissvelg Hlíðardalslækjar (Dallækjar) kemur óljóst fram í holu LUD-4. Ferilefni sem sett var í Hlíðardalslæk skammt norðan við holu AB-2 skilaði sér í litlum mæli í holuna. Engin merki hafa fundist í lindum við Mývatn um ferilefni sem sett hafa verið niður í Hlíðardalslæk eða í sveltinn í Búrfells-hrauni.

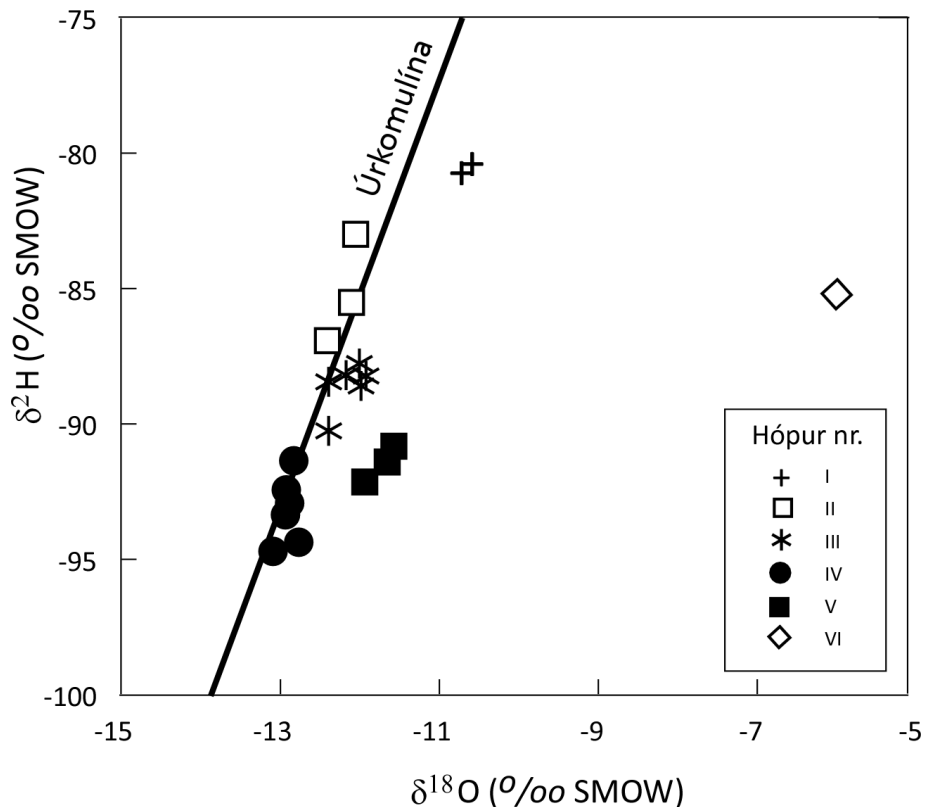
Síðastgreindu niðurstöðunum ber vel saman við niðurstöður vöktunar á styrk arsens í grunnvatni sem greint er frá hér að ofan; arsen í skiljuvökva frá Kröfluvirkjun sem losað er í Hlíðardalslæk skilar sér greinilega í holu LUD-4 en engin merki sjást um að það berist í lindir við Mývatn.

4 Efnafræði grunnvatns og uppruni þess

Í þessum kafla verður fjallað um hvernig efnasamsetning volga grunnvatnsins í Mývatnssveit getur varpað ljósi á uppruna þess og eins varmann í því.

Á liðnum árum hefur margt verið skrifað um efnafræði grunnvatnsins við austanvert Mývatn og var t.d. samantekt birt í grein Hrefnu Kristmannsdóttur og Halldórs Ármannssonar (2004).

Halldór Ármannsson o.fl. (1998) flokkuðu grunnvatn í Mývatnssveit í 6 flokka á grundvelli greininga á vetnis- og súrefnissamsætum í vatninu. Af þessum sex flokkum eru affallsvatn frá virkjununum í Kröflu og Bjarnarflagi í flokkum I og VI. Í tveimur hinna flokkanna er annars vegar kalt grunnvatn (flokkur IV) ættað úr straumi grunnvatns sunnan að og hins vegar straumi norðan að (flokkur II). Í þeim tveimur sem eftir eru er volgt grunnvatn, annars vegar norðan að (eða a.m.k. staðbundið) (flokkur III) en einn hópurinn virðist bera einkenni vatns sem er ættað að sunnan en með jarðhitaeinkenni (súrefnistilfærslu, háan efnahita) (flokkur V). Á mynd 17 er sýnt hvar helst má búast við vatni úr flokkum II-V. Þar eru einnig sýndir niðursetningarstaðir ferilefna (A – D) og dregnar inn örvar sem sýna líklegt grunnvatnsrennsli þegar tekið hefur verið tillit til niðurstaðna Verkfræðistofunnar Vatnaskila (2008), Halldórs Ármannssonar o.fl. (1998) og ferilprófana þeirra sem lýst er hér að framan.



Mynd 18. Samsætuhlutföll vetnis og súrefnis í vatni í Mývatnssveit og flokkun þess (Halldór Ármannsson o.fl., 1998).

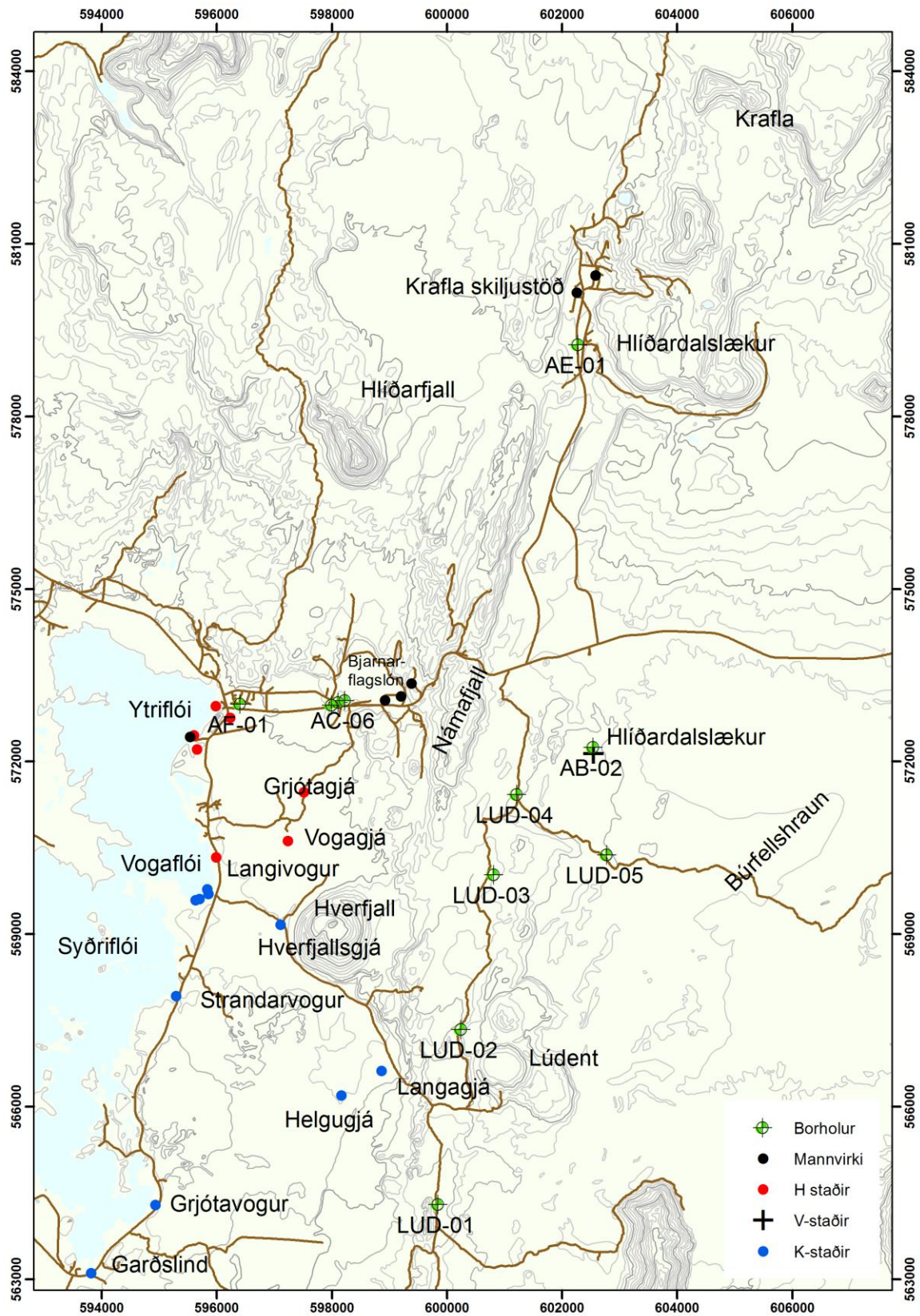
Samkvæmt þeim athugunum á breytingum á efnasamsetningu með hita sem hér fara á eftir virðist mestallt eða allt volga vatnið eiga uppruna sinn norður frá, þ.e. í Kröflu, þó að ekki sé fyllilega ljóst hvaðan varminn til hitunar þess kemur. Vísbending um þetta fékkst í Kröflueldum því að lindavatn hitnaði í tengslum við kvikuhlaup til suðurs 1977 og 1980 en ekki í sambandi við aðra atburði. Sé vísað til rennislíkans Vatnaskila (1999) var gert ráð fyrir um 8 m³/s rennsli í Ytriflóa og erfitt að sjá annað en að það væri svo til allt ættað sunnan að. Því var ekki ljóst hvernig gera ætti grein fyrir öflugum, volgum straumi að norðan. Í endurskoðuðu líkani (Verkfræðistofan Vatnaskil, 2008) er rennsli til Ytriflóa um 11 m³/s og viðbótin að mestu komin norðan að svo að hugmyndin um volgan straum norðan að gengur betur upp. Ef lítið er til flokkunar Halldórs Ármannssonar o.fl. (1998) og nýja grunnvatnslíkansins er erfitt að fá flokk V til þess að falla að því líkani því að bæði eru samsætugildi og staðsetning í grunnvatnsstraumi á þann veg að um vatn ættað að sunnan ætti að vera að ræða. Hitnun og efnabreytingar komu þó greinilega fram í tengslum við kvikuhlaupin. Ekki er um marga athugunarstaði að ræða milli Kröflu og Mývatns til að kanna varmaflutning. Rétt er þó að geta þess að gamla kaldavatnsholan í Kröflu, AE-1, hefur mælst 26–29°C heit og eru því merki um hita í grunnvatnsstraumnum þar. Einnig sjást merki um hitatoppa holum KV-1 og KH-6 á vestursvæði Kröflu.

Í grófum dráttum má segja að þrír möguleikar komi til greina varðandi uppruna varmans í volga grunnvatninu í Mývatnssveit. Í fyrsta lagi gæti verið um að ræða gufuhitað grunnvatn og er þá langnærtækast að álykta að gufan komi úr jarðhitakerfinu í Námafjalli. Á hinn bóginn gæti hugsast að volga grunnvatnið sé orðið til við blöndun á köldu grunnvatni, líku því sem fellur í Syðriflóa, og háhitavökva, en tveir möguleikar koma til greina varðandi

uppruna háhitavökva í kerfinu; hann gæti verið ættaður úr Námafjallskerfinu eða frá Kröflu. Svo er auðvitað hugsanlegt að tveir þessara möguleika eigi við eða jafnvel allir þrír. Mismunandi efnasamsetning jarðhitagufu og jarðhitavökva frá Kröflu annars vegar og Námafjalli hins vegar felur í sér vísbendingu um uppruna varmans í volga grunnvatninu.

4.1 Gagnasafn

Í þessari athugun eru allar efnagreiningar af grunnvatni úr Mývatnssveit, austan Mývatns, sem til eru í gagnasafni ÍSOR notaðar. Mynd 18 sýnir staðsetningu sýnatökustaða. Sýnin eru ýmist úr heitum (rauð tákn á myndum sem sýna efnastyrk, sjá mynd 19) eða köldum (blá tákn) lindum eða borholum (græn tákn). Á myndinni eru einnig sýndir sýnatökustaðir í mannvirkjum (svört tákn) en þau koma ekki við sögu hér.

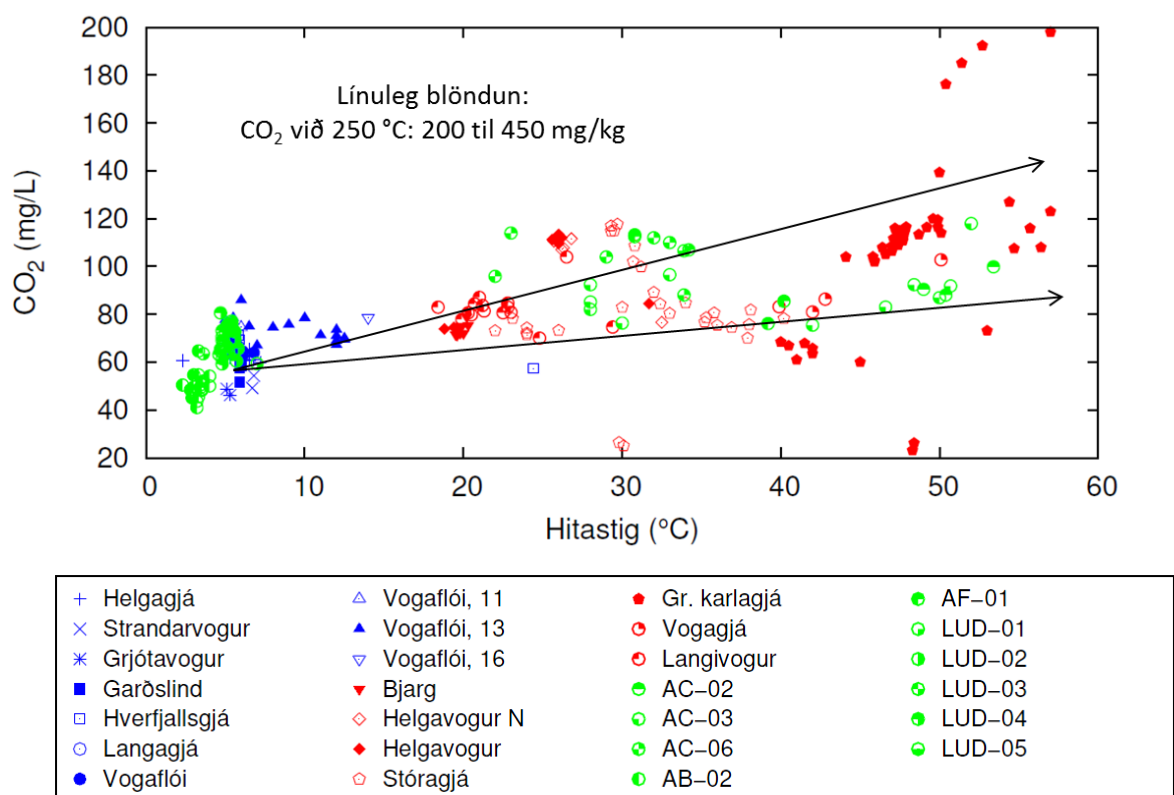


Mynd 19. Sýnatökustaðir affallsvatns og grunnvatns í Mývatnssveit.

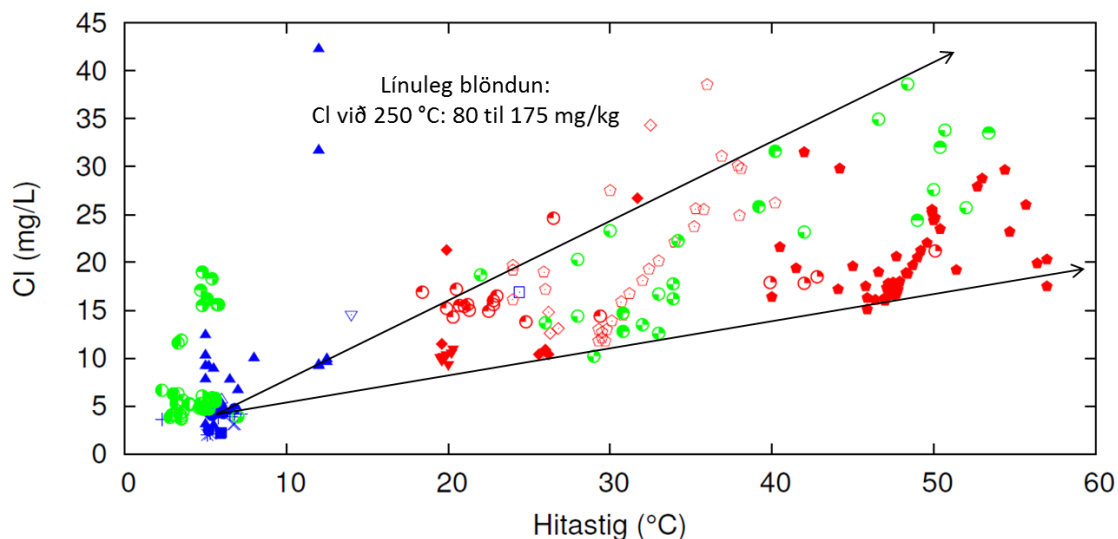
4.2 Gufuhitað grunnvatn samanborið við jarðhitavökva

Þegar gufa myndast við suðu í jarðhitakerfum fara uppleystar gastegundir að verulegu leyti í gufufasann en uppleyst steinefni sitja eftir í vökvanum. Helstu gastegundir í jarðhitagufu eru koldíoxíð (CO_2) og brennisteinsvetni (H_2S). Klóríð (Cl) er á hinn bóginn dæmi um uppleyst efni sem situr eftir í jarðhitavökvanum. Ef uppruni varmans í volga grunnvatninu í Mývatnssveit er jarðhitagufa ætti styrkur CO_2 í volga grunnvatninu að aukast í hlutfalli við hitastig þess en styrkur Cl ætti að vera óháður hitastigi eða jafnvel lækka lítillega með hækkandi hitastigi. Hins vegar, ef volga grunnvatnið hefur orðið til við blöndun kalds grunnvatns við jarðhitavökva myndi styrkur bæði CO_2 og Cl aukast með vaxandi hitastigi.

Myndir 20 og 21 sýna styrk CO_2 annars vegar og Cl hins vegar í volga grunnvatninu í Mývatnssveit. Myndirnar sýna glögglega að styrkur beggja efna hækkar í hlutfalli við hitastig grunnvatnsins. Skýr fylgni Cl við hitastig sýnir svo ekki verður um villst að varminn í volga grunnvatninu er að verulegu leyti tilkominn með blöndun jarðhitavökva við kalt grunnvatn. Fylgni milli CO_2 og hitastigs er líka hægt að skýra með blöndun grunnvatns við djúpvökva því háhitavökvi inniheldur yfirleitt meira CO_2 en grunnvatn. Ekki er þó hægt að útiloka að fylgni CO_2 við hitastig skýrist að einhverju leyti með því að grunnvatnið sé hitað með gufu að einhverju leyti.



Mynd 20. Styrkur CO_2 í grunnvatni úr Mývatnssveit á móti hitastigi við söfnun. Örvarnar sýna mögulegar blandlínur milli kalds grunnvatns og jarðhitavökva.



Mynd 21. Styrkur Cl í grunnvatni úr Mývatnssveit á móti hitastigi við söfnun. Örvarnar sýna mögulegar blandlínur milli kalds grunnvatns og jarðhitavökva.

4.3 Uppruni jarðhitavökvans í volga grunnvatninu í Mývatnssveit

Þegar ljóst er að volga grunnvatnið í Mývatnssveit er orðið til við blöndun á köldu grunnvatni og jarðhitavatni liggur beint við að huga að því hvað efnasamsetning og samsætuhlutföll volga vatnsins geta sagt okkur um efnasamsetningu og þar með uppruna jarðhitavatsins. Hér er sú leið farin að nota efnagögnin á móti hitastigi til að skilgreina beinar blöndunarlínur út frá efnasamsetningu eða samsætuhlutfalli kalda vatnsins í átt að hækkandi hita. Þessar blöndunarlínur eru svo notaðar til að reikna samsetningu jarðhitavökvans við eitthvert líklegt djúphitastig. Hér er hitastigið 250°C notað til að reikna samsetningu djúpvökvans. Þessi nálgun felur í sér þá einföldun að gert er ráð fyrir að varmarýmd vatns sé óháð hitastigi sem er strangt til tekið ekki rétt. Þessi nálgun er þó fullgóð í fyrstu umferð.

Fyrir hvert gagnasett eru skilgreindar tvær blöndunarlínur sem ganga út frá kalda vatninu og „ná utan um gögnin“ og standa fyrir hæsta og lægsta líklegan halla á blandlínunum milli kalds grunnvatns og jarðhitavökva. Efnasamsetning og samsætuhlutföll djúpvökva eru því sett fram sem bil frekar en eitt gildi. Í þeim tilfellum sem efnasamsetning eða samsætuhlutföll kalda grunnvatnsins voru mjög dreifð var miðað við að gildin fyrir Garðslind giltu fyrir óspjallað grunnvatn á svæðinu.

Þessi aðferð hentar ekki fyrir öll efni. Efni sem eru í miklu magni í bergi eru ekki gagnleg til að skilgreina blöndunarferla, sérstaklega ef styrkur þeirra stjórna af hitastigi. Þá eru rokgjörn efni sem tapast auðveldlega úr vökvunum einnig óheppileg. Hér er einkum stuðst við styrk Cl og hlutfall vetnissamsætna (δD). Bæði vetni og klóríð eru í mjög lágu styrk í bergi og hafa efnahvörf við berg því mjög takmörkuð áhrif á styrk Cl og hlutfall vetnissamsætna í volga vatninu. Þá er einnig heppilegt að styrkur Cl er talsvert hærri á sumum stöðum í Kröflu en í Námafjalli og hlutfall tvívetnis í jarðhitavökvunum í Námafjalli er töluvert lægra en gerist í Kröflu.

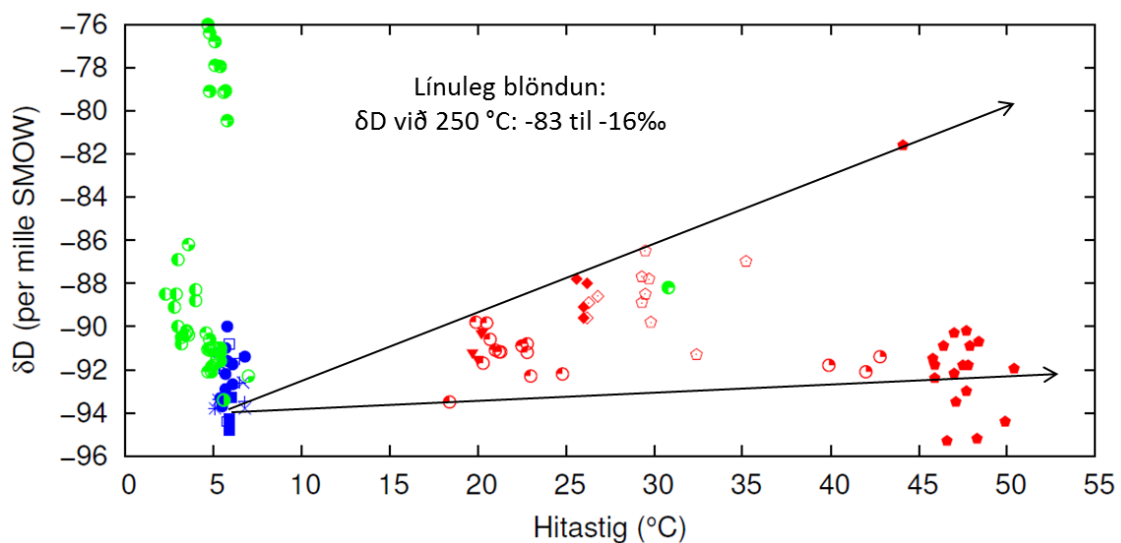
Eins og fyrr segir sýnir mynd 21 styrk Cl í grunnvatni á móti hita. Það er greinilegt að styrkur Cl eykst með hækkandi hitastigi þó að nokkur dreifing sé í Cl-gildunum. Hár styrkur Cl í LUD-4 er mest áberandi frávikið frá línulegri blandhegðun því að þar er styrkur Cl

frekar hár (15–20 mg/L) þótt hitastig sé lágt. LUD-4 er undir áhrifum affallsvatns frá Kröflu-virkjun sem blandast grunnvatni skammt frá holunni. Frekari merki þeirrar blöndunar sjást í styrk arsens í LUD-4 en hann er umtalsvert hærri en á öðrum vöktunarstöðum grunnvatns í Mývatnssveit.

Samkvæmt blandlínunum á mynd 21 má reikna með að styrkur Cl í jarðhitavökvanum sé á bilinu 80–175 mg/L sé miðað við að djúphitastigið sé 250°C. Ef reiknað er með að hitastig vökvans sé 200°C fæst Cl-styrkur upp á 65–140 mg/L.

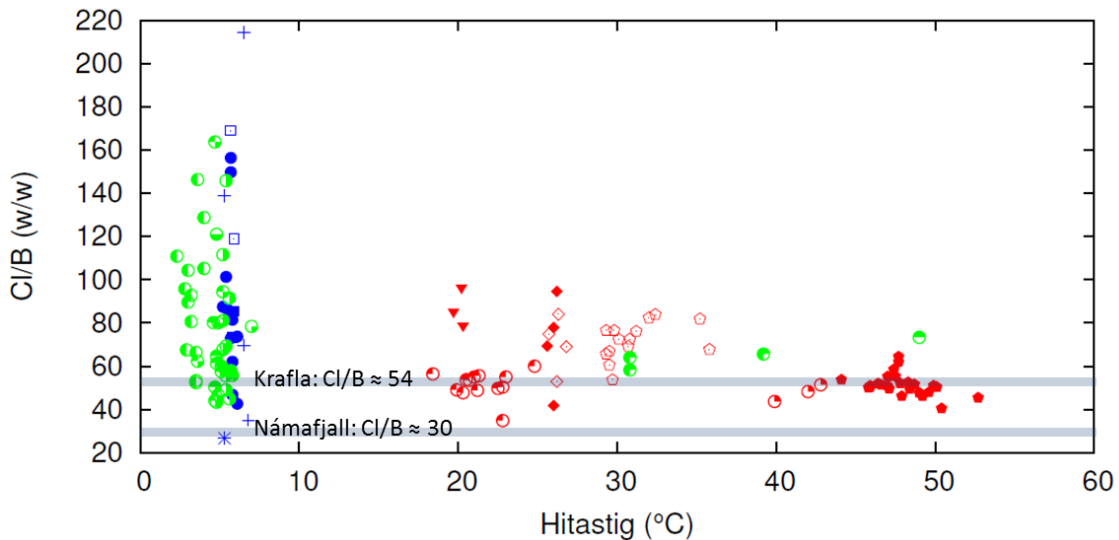
Mynd 22 sýnir tvívetnishlutfall (δD) í grunnvatni í Mývatnssveit. Tvívetnisgögnin bera ekki eins skýr merki blöndunar og styrkur Cl og CO₂. Þó má sjá að köldu lindirnar við Mývatn (blá tákn) hafa almennt lægra tvívetnishlutfall en heitu lindirnar (rauð tákn). Sérstaklega er tvívetnishlutfallið í Garðslind lágt en hér er litið svo á að það sé dæmigert fyrir stóra grunnvatnsstrauminn sem kemur að suðaustan inn í Syðriflóa. Nokkur sýni úr Grjótagjá skera sig einnig úr með lágum tvívetnisgildum.

Það er ekki einhlítt hvernig draga skal blandlínur í gegnum tvívetnisgögnin. Hér er farin sú leið að nota tvívetnisgildi sýnanna úr Garðslind fyrir kalda grunnvatnið og líta framhjá fimm lægstu tvívetnisgildunum úr Grjótagjá sem falla neðan við neðri blandlínuna (13 sýni úr Grjótagjá falla ofan við línuna). Blandlínurnar sem fást með þessum hætti gefa tvívetnisgildi djúpvökva við 250°C uppá -83 til -16‰. Við 200°C fást -85 til -32‰.



Mynd 22. Vetrissamsættuhlutfall grunnvatns í Mývatnssveit á móti hitastigi.

Bór (B) er heppilegt efni til að rekja uppruna vatns á sama hátt og Cl þar sem það er ekki í miklum styrk í bergi og styrkur þess stjórnast ekki af jafnvægi við ummyndunarsteindir. Mynd 23 sýnir massahlutfallið Cl/B í grunnvatni í Mývatnssveit á móti hitastigi. Þar sést að við lágan hita er nokkur dreifing í Cl/B hlutfallinu en með hækkandi hita virðist hlutfallið leita að markgildi nálægt 50.



Mynd 23. Massahlutfall Cl og B í grunnvatni í Mývatnssveit. Cl/B hlutfall jarðhitavökva í Kröflu og Námafjalli er einnig sýnt.

4.4 Klóríðstyrkur, Cl/B hlutfall og tvívetni í jarðhitavökva frá Kröflu og Námafjalli

Styrkur Cl í djúpvökva í Kröflu er allbreytilegur frá einum stað til annars innan kerfisins en er þó almennt ívið hærri en í Námafjalli. Þó er klóríðstyrkur lágur í efri kerfunum í Leirbotnum og Hvíthólum en hár í holu B-14 í Bjarnarflagi. Styrkur Cl í skiljuvökva frá Kröflu-stöð hefur verið á bilinu 65–75 mg/L á undanförunum árum en Cl styrkur í Bjarnarflagslóni hefur verið nær 50 mg/L þótt hærri gildi hafi sést þar.

Cl/B hlutfall í skiljuvatni frá Kröflu er á bilinu 34–74 með meðalgildi 54 en samsvarandi Cl/B gildi fyrir Bjarnarflagslón er 20–35 með meðalgildi 30. Æskilegt væri að taka saman upplýsingar um Cl/B gildi fyrir einstakar vinnsluholur í Kröflu til að fá yfirlit yfir svæðisbundinn breytileika á þessu hlutfalli. Við fyrstu sýn benda þessar niðurstöður til þess að jarðhitavatnið sem hefur blandast grunnvatninu í Mývatnssveit sé ættað úr Kröflu frekar en úr Námafjalli.

Tvívetnisgildi djúpvökva í Námafjalli eru lág, eða á bilinu -94 til -101%. Spönn tvívetnisgilda í Kröflu er veruleg en þar eru víða talsvert hærri (þ.e. minna neikvæð) tvívetnisgildi. Á Leirhnjúkssvæðinu eru þau á bilinu -79 til -88% og á bilinu -84 til -89% í Leirbotnum og Vesturhlíðum, og lægri í Suðurhlíðum, Hvíthólum og Sandabotnum.

Blandlínur fyrir tvívetni og klóríð benda, eins og fyrr segir, til þess að Cl-styrkur í djúpvökvanum sem blandast við grunnvatnið í Mývatnssveit sé 60–175 mg/L og að tvívetnisgildi hans sé um -85 til -16%. Styrkur Cl í djúpvökvanum er heldur hærri en það sem almennt gerist í Námafjalli en er nær því sem sést á vesturhluta Kröflusvæðisins. Þá er tvívetnis-hlutfallið sem fæst fyrir djúppáttinn með blandlínunum nær því sem sést í vesturhluta Kröflusvæðisins. Ef grunnvatnið í Mývatnssveit væri blandað jarðhitavökva úr Námafjalls-kerfinu ætti hallatala blandlínunnar að vera neikvæð. Og þó að lega neðri blandlínunnar á tvívetnismyndinni sé ekki fullkomlega einhlít má engu að síður sjá af gögnunum að erfitt er að sjá merki þess að jarðhitapátturinn hafi jafn lágt tvívetnisgildi og almennt er í Námafjalls-kerfinu.

5 Tengsl lífríkis og efnafræði grunnvatns

Tengsl lífríkisins í Mývatni við efnasamsetningu grunnvatnsins sem til þess streymir hafa verið rannsökuð ítarlega á undanförunum áratugum. Náttúrurannsóknarstöðin við Mývatn (RAMÝ) hefur verið í fararbroddi þeirra rannsókna. Verður hér stuttlega tæpt á nokkrum atriðum er varða tengsl grunnvatns og lífríkis og stuðst við m.a. skrif Árna Einarssonar o.fl., (2004), Árni Einarsson, 1991, Opfergelt o.fl. (2011) og Jóns Ólafssonar (1979a) auk upplýsinga í bókinni Náttúra Mývatns frá 1991 (Arnþór Garðarsson og Árni Einarsson, 1991).

Vistkerfi Mývatns-Laxár er mjög breytilegt í tíma og rúmi. Svæðisbundinn breytileiki stafar fyrst og fremst af mismun á eiginleikum þess grunnvatns sem streymir inn í vatnið en eins og fram hefur komið streymir volga grunnvatnið eingöngu inn í Ytriflóa. Einnig skipta máli vatnsdýpi og flókin setmyndunarferli sem stjórnast af vogskorinni strönd og mörgum eyjum og hólum í vatninu. Mikill breytileiki er í magni mýs í vatninu og hefur hann umtalsverð áhrif á fjölskrúðugt fugla- og fiskalíf.

Áhrif veðurfarsþátta á lífríkið hafa ekki komið fram með skýrum hætti.

Eftir því sem vatnið hefur grynnað hafa botnlægar (benthic) lífverur orðið meira áberandi. Magn grænþörungna hefur aukist mikið á síðustu fjórum öldum. Lítil kísilþörungnaframleiðsla var á tímabilinu 50–150 eftir Krist. Gæti það tengst breytingum á innstreymi jarðhitavökva í vatnið. Lífríkið síðustu 2300 árin hefur verið skoðað í kjörnum úr setlögum í vatninu. Gjósufall er talið hafa áhrif á magn næringarefna í vatninu.

Meðalsetþykkt í Ytriflóa er 4,3 m. Setið í honum er samsett úr kísilþörungum (55%) og ösku og vindbornu efni (30%). Magn lífræns efnis er á bilinu 10–30%. Setþykktin er á milli 2–8 m í Syðriflóa, mest kísilþörungaeðja (gyttja). Setþykkun er á bilinu 1,5–2,7 mm/ári (í kjarna frá 1985), meðalþykkun um 2,1 mm/ári.

Almennt má segja að kísilþörungar séu mjög viðkvæmir fyrir kísilskorti. Í hafinu leysast um 90% af kísilþörungum upp áður en þau ná að falla á botninn. Leysni lífmyndaðs ópals (kísilþörungna) stjórnast aðallega af undirmettun sjávar með tilliti til styrks kísilsýru en einnig af sýrustigi (pH), hita og yfirborðsflatarmáli og styrk áls. Kísilsamsætur þættast í kísilþörungum óháð hita, sýrustigi, seltu og tegundum þörunganna. Mikil framleiðni er í Mývatni og talin ein sú mesta í vötnum á norðurhveli jarðar. Kísilþörungar eiga mestan þátt í því. Við vöxt taka þeir inn hlutfallslega meira af léttum kísilsamsætum en þungum. Mest frumframleiðsla fer fram á botni þar sem hlutur kísilþörungna er mestur en einnig eiga stóran hlut grænþörungar og bláþörungar.

Innstreymi er úr bæði köldum og volgum lindum. Samsætusamsetning kísils er sú sama í báðum vatnsgerðunum. Meðalhiti kalda vatnsins er $6,2^{\circ}\text{C} \pm 1,4^{\circ}\text{C}$ sýrustig $9,4 \pm 0,2$ og volga vatnsins $30,5^{\circ}\text{C} \pm 12,4^{\circ}\text{C}$ og sýrustig $8,3 \pm 0,3$. Natríum-, kalíum- og kalsíumstyrkur kalda lindavatnsins er lægri en volga vatnsins. Magnesíum- og álstyrkur er svipaður í báðum vatnsgerðum. Kísilstyrkur er miklu hærri í volga lindavatninu en því kalda eins og fram hefur komið.

Gildi kísilsamsætna ($\delta^{30}\text{Si}$) breytast árstíðabundið við útfallið úr Mývatni. Toppar eru í maí til júní (1,42‰), lægð í júlí (0,72‰) og svo toppur aftur í september til október (1,36‰) hvert ár. Toppa má skýra með því að kísilþörungar taka upp hlutfallslega meira af léttum samsætum en þungum þegar þeir vaxa. Há $\delta^{30}\text{Si}$ gildi mælast því þegar vöxtur þeirra er í

hámarki. Um mitt sumarið hækkar sýrustig (í 9,5–10) og veldur því að kísilþörungar leysast upp. Þannig eykst hlutfall létttra samsætna í útfallinu um mitt sumar (lægri $\delta^{30}\text{Si}$ gildi).

Þykk öskulög virðast hafa áhrif á lífríkið, t.d. minnkar magn kúluskíts, kornátu og skötuorms ofan við öskulagið V-1477 (sem er þykkasta lagið í setinu og er komið úr gosi í Bárðarbungukerfinu). Ýmsar lífverur eiga sitt blómaskeið eftir 1717, s.s. kúluskítur, botnkrabbar, kornáta og rykmý. Engar skyndilegar breytingar eru merkjanlegar á landnámsöld en miklar breytingar urðu fyrr, á 1.–7. öld e.Kr. Botnkrabbategundir hafa átt erfitt uppdráttar á því tímabili. Einnig er lítið um kornátu (*Eurycercus*) á þeim tíma. Þéttleiki slæðumýs er hins vegar mestur á þessu tímabili og sama má segja um toppmý. Verulegar breytingar komu einnig fram á kísilþörungum af ættkvíslinni *Fragilaria*, sem eru um 95% kísilþörungar í vatninu. Hlutfall afbrigðisins *Fragilaria construens* var. *venter* eykst úr um 10% af *F. construens* þörungum í um 60% á 1.–7. öld.

Kísilþörungar eru næmir fyrir breytingum í efnasamsetningu vatns, einkum sýrustigi og seltu. Hugsanleg skýring eru sveiflur í bláþörungagróðri en hámörk urðu í honum á 1.–6. öld og svo 15.–17. öld. Mikill vöxtur bláþörungar veldur gruggi í vatninu. Mögulegt er að aukið magn uppleystra næringarefna, s.s. fosfats, hafi valdið auknum bláþörungavexti. Þessa breytingu má hugsanlega tengja breytti efnasamsetningu lindavatns sem streymir í vatnið, einkum þá jarðhitavatninu, kísilstyrkur gæti hafa minnkað, en fram hefur komið að miklar náttúrulegar breytingar hafa orðið á hitastigi og efnasamsetningu lindavatnsins í tengslum við eldsumbrot á svæðinu.

Skil verða í botneðjunni á 5 m dýpi (fyrir rúmlega 2000 árum) en þar fyrir neðan verður hún sandkennd. Nær engar dýraleifar eru í sandbornu leðjunni en mikið af kísilþörungum. Þeir eru vafalaust ættaðir úr forvera Mývatns (fyrir gosið í Þrengslaborgum fyrir rúmum 2000 árum). Önnur tegundaflóra hefur verið í hinu forna vatni en er í Mývatni í dag (*Melosira* voru þá ráðandi).

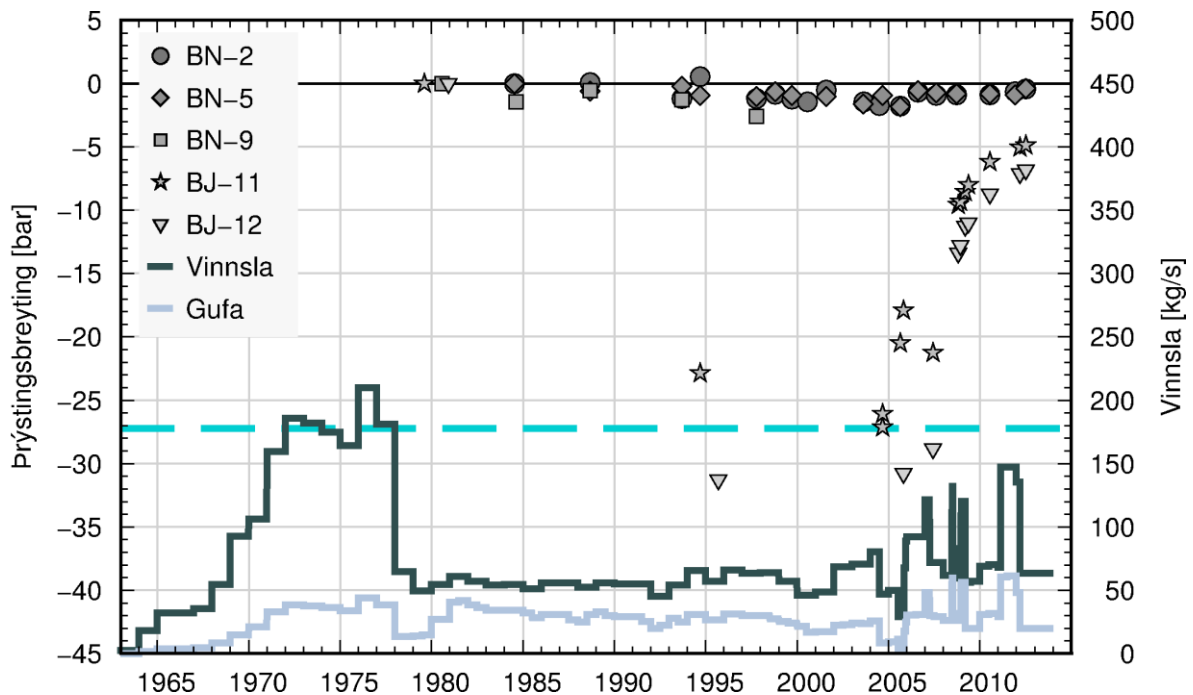
Magn kúluskíts hefur aukist mjög á síðari öldum og tengist það vafalaust grynnkun vatnsins. Kjördýpi virðist vera um 2 m. Kornáta og mýlirfur sækja í botngróður og hefur magn þeirra aukist samfara auknu magni kúluskíts. Rannsóknir RAMÝ sumarið 2013 sýna þó að kúluskíturinn er nánast alveg horfinn úr vatninu. Ekki er vitað hvað veldur.

Kísiliðjan, sem rekin var frá 1966 til 2004, vann kísilgúr af botni Ytriflóa og jarðgufu úr Bjarnarflagi. Gúrinn var hreinsaður við vatnið og úrgangurinn urðaður í nágrenninu. Kísilgúrnámið og starfsemi tengd því (t.d. affall frá verksmiðju) hafði nokkur áhrif á eiginleika vatnsins og lífríkið í Ytriflóa og lýsti það sér helst í hækkuðum styrk næringarefna í lindavatninu, s.s. fosfórs og niturs.

6 Vinnsla úr jarðhitakerfinu

Vinnsla úr jarðhitakerfinu í Námafjalli hófst með borun holu BN-1 árið 1963. Fram til ársins 1970 voru boraðar átta holur til viðbótar. Árið 1967 hóf Kísiliðjan vinnslu og tveimur árum síðar var 3 MW_e raforkuver gangsett í Bjarnarflagi. Meðalársvinnslan jókst jafnt og þétt fyrsta áratuginn eins og sýnt er á mynd 24 en eftir 1972 tóku afköst borholna að dala og þar með dvínaði vinnslan. Til að viðhalda gufuflæði til raforkuvinnslu var hola BN-10 því boruð árið 1975. Á árunum 1977–1984 stóðu Kröfluedar yfir og í umbrotunum skemmdust flestar holurnar í Bjarnarflagi. Vinnslan féll úr 180–200 kg/s vatns í um 50 kg/s fljótlega eftir að jarðhræringarnar hófust. Til að tryggja næga gufu fyrir Kísiliðjuna voru boraðar tvær holur

til viðbótar árin 1979–1980, BJ-11 og BJ-12, og hafa þær holur lengst af verið aðalvinnsluholurnar. Á milli 1980 og 2002 var vinnslan mjög stöðug í kringum 50 kg/s og áætlað rafafli¹ um 20 MWe. Boranir hófust að nýju árið 2006 til að afla gagna um jarðhitakerfið vegna fyrirhugaðrar virkjunar svæðisins. Hóla BJ-13 var boruð árið 2006 og tekin í notkun stuttu eftir borlok. Við það jókst meðalársvinnslan úr 50 í 90 kg/s. Lokið var við borun holna BJ-14 og BJ-15 árið 2008. Síðustu árin hefur vinnslan verið nokkuð óregluleg, annars vegar vegna blástursprófana á nýjum holum og hins vegar vegna þess að erfitt hefur reynst að koma holum BJ-11 og BJ-12 í blástur en þær hafa staðið lokaðar frá árinu 2007.



Mynd 24. Meðalársvinnsla jarðhitavökva og áætlað gufuflæði úr jarðhitakerfinu í Námafjalli ásamt mældum niðurdrætti í borholum í Bjarnarflagi. Brotalínan sýnir áætlaða massatöku við 45 MWe raforkuvinnslu reiknaða út frá hönnunarforsendum.

Lengst af hafa mælingar á hita og þrýstingi í borholum í Bjarnarflagi verið stopular. Til eru reglulegar mælingar í holum BN-2 (492 m djúp) og BN-5 (638 m djúp), sem nýttar hafa verið sem eftirlitsholur. Mælingar í þeim benda til lítillar sem engrar þrýstilækkunar ofarlega í kerfinu, eða niður á um 600 m dýpi. Til eru mælingar í holum BJ-11 og BJ-12 sem gefa mynd af þróun þrýstings í jarðhitakerfinu neðan um 700 m dýpis, sem ásamt nýlegum mælingum úr holum boruðum frá 2006–2008 benda til þess að austan Krummaskarðsmisgengisins sé þrýstilækkunin nálægt 5 bar. Í sprungustykkinu vestan misgengisins mælist lítil sem engin þrýstilækkun vegna vinnslu undangenginna 50 ára.

Með hjálp þrívíðs reiknilíkans af jarðhitakerfinu í Námafjalli (Sigríður Sif Gylfadóttir o.fl., 2011) hafa áhrif 45 MWe virkjunar til 30 ára á þrýstifall í jarðhitakerfinu verið metin. Án niðurdælingar má búast við þrýstifalli upp á tæplega 20 bar yfir 30 ára tímabil en með rétt hannaðri niðurdælingu má draga úr því um nærri 10 bar. Í líkaninu hefur vinnslan óveruleg

¹ M.v. 1,85 kg/s/MWe.

áhrif á þrýsting fyrr en komið er niður fyrir um 300 m dýpi og niður á 600 m dýpi er þrýstilækkunin engin á stóru svæði þar sem áhrifa niðurdælingar gætir, og innan við 5 bar utan þess. Hafa ber í huga að líkanið er fyrst og fremst þróað til að herma sjálft jarðhitakerfið neðan um 700 m dýpis og gögn sem liggja að baki kvörðun efri laga eru af skornum skammti.

7 Vöktunaráætlun fyrir 45 MW virkjun í Bjarnarflagi

Efnasamsetning grunnvatns í Mývatnssveit hefur verið vöktuð með einum eða öðrum hætti um margra áratuga skeið eins og fram hefur komið hér að framan. Síðastliðinn áratug hefur vöktunin verið í föstum skorðum og unnin eftir samkomulagi sem gert var 2003 milli Umhverfisstofnunar og Landsvirkjunar. Sýnum til efnagreininga er safnað tvisvar á ári á tíu eftirlitsstöðum og skýrslu með niðurstöðum skilað árlega.

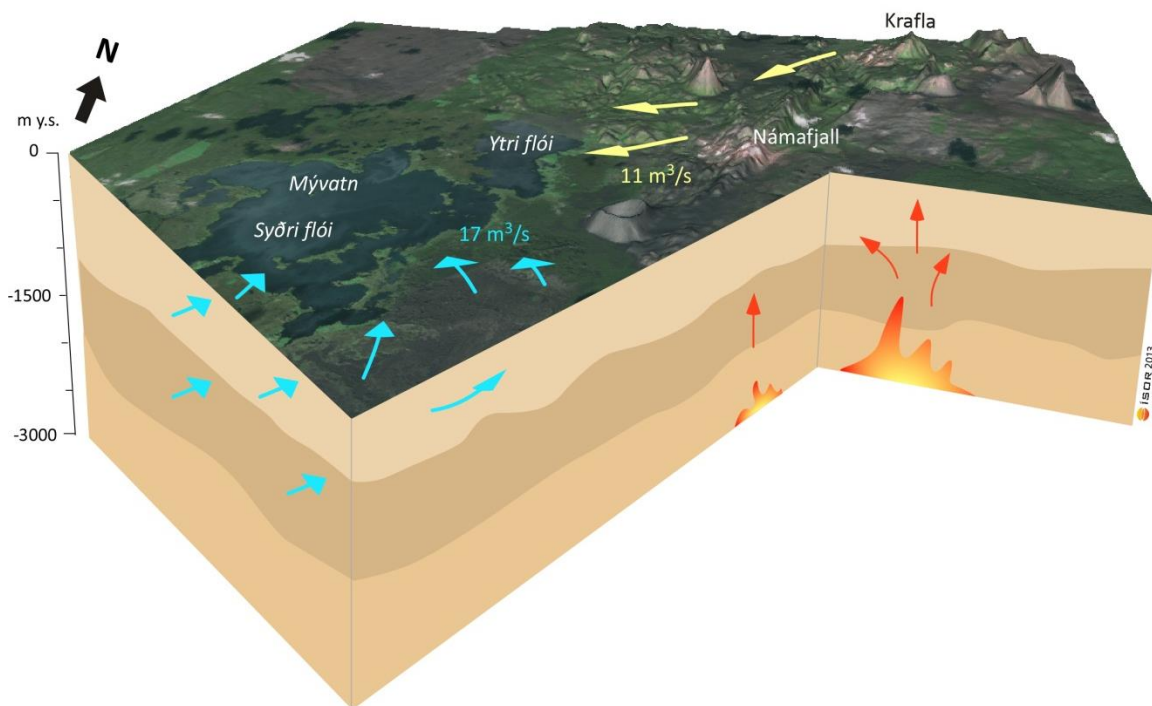
Hugmyndir um vöktun vegna 45 MW virkjunar í Bjarnarflagi:

- Viðhalda þeirri efnavöktun sem verið hefur undanfarin áratug. Tíu eftirlitsstaðir. Bæta við upplýsingum um rennsli þar sem því verður við komið og vatnsborð, t.d. í borholum. (Safna sérstökum sýnum fyrir greiningar á kvikasilfri (Hg).)
- Bæta við eftirfarandi sýnatökustöðum: Helgavogur, Kálfstjörn, Stóragjá, Garðslind, Hverfjallsgjá, Vogagjá, Grjótagjör og holur LUD-5, LUD-6 (norður af Hverfjalli) og LUD-8 (vestan við LUD-3).
- Bora eftirlitsholu til að fylgjast með grunnvatni, vatnsborði, hita og efnasamsetningu, NA af Mývatni í átt að Hlíðarfjalli og Leirhnúk/Kröflu. Þar gætu fengist upplýsingar um grunnvatn ættað frá Kröflu.
- Bora eftirlitsholu austan Mývatns ca. milli Voga og Helgavogar til að fylgjast með vatnsborði, hita og efnasamsetningu grunnvatnsins.
- Koma upp síritandi vöktun vatnsborðs og hita í borholum (með „putta“). Vakta hita víðar eins og gert hefur verið í t.d. Grjótagjá og Stóragjá.
- Mæla vatnsborð og taka sýni úr einhverjum af holunum í Eldhrauni sem voru boraðar til að kanna útbreiðslu kísilgúrs undir hrauninu, ef þær eru opnar niður í vatn.
- Endurtaka með reglulegu millibili hitamælingar í lindum, líkt og gert var 1983, og teikna jafnhitalínur í grunnvatni.

8 Lokaorð og helstu niðurstöður

Í skýrslunni hefur verið gerð grein fyrir því eftirliti sem hefur verið haft með vinnslu jarðhitavökva í Bjarnarflagi nánast óslitið frá um 1970 og í sumum tilvikum allt frá því boranir hófust þar 1963. Gerð er grein fyrir grunnvatnsstreymi til Mývatns með sérstakri áherslu á Ytriflóa og volga vatnið sem þangað streymir.

Á grundvelli þeirra rannsókna sem unnar hafa verið í Mývatnssveit á undanförunum áratugum má sjá fyrir sér streymi grunnvatnsins og samspil þess við jarðhitakerfin í Námafjalli og Kröflu líkt og gert er í einföldu líkani á mynd 25.



Mynd 25. Einfaldað líkan af grunnvatnskerfinu við austanvert Mývatn og samspili þess við jarðhitakerfin í Námafjalli og Kröflu.

Helstu niðurstöður eru eftirfarandi:

- Mývatn er eitt stærsta lindasvæði Íslands og er talið að vatnasvið þess sé um 1500 km² að flatarmáli.
- Langstærsti hluti grunnvatnsstreymis til Mývatns er hluti af miklu stærri grunnvatnsstraumi í N-gosbeltinu sem rekja má allt til Dyngjufjalla í suðri og á haf út í Öxarfirði.
- Hluti grunnvatnsins úr suðri hitnar af völdum jarðhitakerfisins í Námafjalli og blandast jarðhitavatni þaðan og frá Kröflu og myndar volgan grunnvatnsstraum sem fellur til Ytriflóa.
- Líkanreikningar benda til að um 11 m³/s af köldu og volgu vatni falli til Ytriflóa og um 17 m³/s til Syðriflóa.
- Umtalsverðar náttúrulegar sveiflur hafa átt sér stað í hitastigi grunnvatns við austanvert Mývatn í tímans rás, eins og glögg kom fram í Kröflueldum 1975 til 1984.
- Líklegt má telja að ekki minni breytingar hafi átt sér stað í Mývatnseldum 1724 til 1729.
- Í þessum náttúrulegu atburðum hækkaði hitastig grunnvatns við austanvert Mývatn um 10–20°C og efnasamsetning þess breyttist umtalsvert.
- Efnasamsetning og samsætuhlutföll í volgu grunnvatni í Mývatnssveit benda til þess að vatnið sé að litlu leyti gufuhitað grunnvatn heldur sé það kalt grunnvatn sem blandast hefur jarðhitavökva.
- Tvívætnishlutföll og hlutfall Cl og B í grunnvatni í Mývatnssveit benda til þess að jarðhitavökvi sá sem hefur blandast grunnvatninu sé ættaður úr jarðhitakerfinu í Kröflu.

- Vinnsla jarðhitavökva í Bjarnarflagi á árunum 1971 til 1977 nam um 150–200 kg/s og hafði hún hvorki áhrif á hitastig volga grunnvatnsins né efnasamsetningu, t.d. styrk kísils. Sama má segja um vinnslu fyrir 1971 og eftir 1977 þótt hún hafi verið umtalsvert minni.
- Vinnsla jarðhitavökva í Bjarnarflagi hefur haft lítil áhrif á þrýsting í jarðhitakerfinu þótt ekki hafi verið dælt niður.
- Reynslan af vinnslu jarðhitavökva í Bjarnarflagi milli ára 1971 og 1977 bendir til að áhrif af fyrirhugaðri 180 kg/s vinnslu fyrir 45 MW raforkuver, með niðurdælingu, muni ekki hafa áhrif á volga grunnvatnið.
- Stöðugt hitastig og rennsli volga grunnvatnsins á árunum 1971 til 1977 er í samræmi við þær hugmyndir að uppruni varmans sé afrennsli jarðhitavatns frá vestursvæði Kröflu.
- Niðurstaða þeirrar vöktunar sem fram hefur farið á efnainnihaldi grunnvatns við austanvert Mývatn, þar sem affallsvatni Bjarnarflagsvirkjunar og að hluta til Kröfluvirkjunar er fargað á yfirborði, sýnir enga langtíma leitni í átt að hækkandi styrk arsens.
- Niðurstöður arsenmælinga sýna að styrkur þess í grunnvatni við austanvert Mývatn er nánast í öllum tilvikum innan við umhverfismörk I ($< 0,0004$ mg/L) og oftast undir greiningarmörkum mæliaðferðarinnar, $0,00005$ mg/L.
- Einungis sýni af affallsvatni í Bjarnarflagslóni, Kröflustöð og í Hlíðardalslæk hafa hærri arsenstyrk en hámark neysluvatnsstaðals segir til um ($0,01$ mg/L).
- Útreikningar sýna að árlega falla til um 150 kg af arseni úr affallsvatni Bjarnarflagsvirkjunar. Frá affallsvatni Kröfluvirkjunar sem rennur í Hlíðardalslæk falla til árlega um 45 kg af arseni.
- Af vöktunarsögunni má draga þá ályktun að ekki sé ástæða til að búast við áhrifum á Mývatn frá núverandi fyrirkomulagi og enn síður ef affallsvökva fyrirhugaðrar virkjunar í Bjarnarflagi verður dælt niður í niðurrennslisholur.
- Áætluð vinnsla 45 MW virkjunar í Bjarnarflagi nemur um 180 kg/s. Niðurdæling jarðhitavökva frá henni mun draga enn frekar úr líkum á að grunnvatn vestan Námafjalls og þar með innrennsli í Mývatn verði fyrir áhrifum jarðhitavinnslu á svæðinu.
- Sveiflur hafa verið í magni og tegundum kísilþörunga í 2300 ára sögu vatnsins, sama á við um ýmsar aðrar lífverur.
- Mikið og flókið ferli á sér stað í samspili jarðhitavökvans frá jarðhitakerfunum í Kröflu og Bjarnarflagi við einn af stærstu grunnvatnsstraumum landsins. Rannsóknir sýna að náttúrulegur breytileiki hefur hingað til haft veruleg áhrif á þetta samspil en engin merkjanleg áhrif hafa komið fram við Mývatn vegna jarðhitanytingar í Bjarnarflagi né í Kröflu.

9 Heimildaskrá

- Arnþór Garðarsson og Árni Einarsson (ritstj.) (1991). *Náttúra Mývatns*. Hið íslenska náttúrufræðifélag, Reykjavík, 1991, 372 s.
- Árni Einarsson (1991). *Lífriki í 2000 ár*. Í Arnþór Garðarsson og Árni Einarsson (ritstj.), *Náttúra Mývatns*. Hið íslenska náttúrufræðifélag, 320–336.
- Árni Einarsson, Gerður Stefánsdóttir, Helgi Jóhannesson, Jón S. Ólafsson, Gísli Már Gíslason, Isamu Wakana, Guðni Guðbergsson og Arnþór Garðarsson (2004). The ecology of Lake Mývatn and the River Laxá: Variation in space and time. *Aquatic Ecology* 38, 317–348.
- Baldur Líndal (1958). *Kísilgúrvinnsla úr botni Mývatns*. Jarðhitadeild, Raforkumálastjóri, Reykjavík.
- Bragi Árnason (1976). Groundwater systems in Iceland traced by deuterium. *Vísindafélag Íslendinga*, 42, 236 s.
- De Zeeuw, E. og Gíslason, G. (1988). *The effect of Volcanic Activity on the Groundwater System in the Námfjall Geothermal Area. NE Iceland*. Orkustofnun, OS-88042/JHD-07, 39 s.
- Halldór Ármannsson (2003). *Förgun affallsvatns frá Kröflu- og Bjarnarflagsvirkjunum*. Orkustofnun, OS-2003/032, 32 s.
- Halldór Ármannsson, Hrefna Kristmannsdóttir og Magnús Ólafsson (1998). *Krafla – Námafjall. Áhrif eldvirkni á grunnvatn*. Orkustofnun, OS-98066, 33 s.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2002). *Efnarannsóknir á vatni úr holum, lindum og gjám í Búrfellshrauni og nágrenni. Undirstöður vöktunar vegna affalls frá jarðhitavirkjunum, Kröflu og Námafjalli*. Orkustofnun, OS-2002/076, 35 s.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2004). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð*. Íslenskar orkurannsóknar, ÍSOR-2004/005, Landsvirkjun, LV-2004/052, 14 s.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2012). *Eftirlit með áhrifum af losun affallsvatns frá Kröflustöð og Bjarnarflagsstöð. Vöktun og niðurstöður 2011*. Íslenskar orkurannsóknar, ÍSOR-2012/006, Landsvirkjun, LV-2012/021, 17 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, Guðni Axelsson, Steinunn Hauksdóttir, Snorri Páll Kjaran og Heiðrún Guðmundsdóttir (2001). *Ferilprófun með kalíumjodíði í Bjarnarflagi 2000–2001*. Orkustofnun, OS-2001/042, 49 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir og Halldór Ármannsson (2004). *Groundwater in the Lake Mývatn area, northern Iceland: Chemistry, origin and interaction*. *Aquatic Ecology* 38, 115–128.
- Hrefna Kristmannsdóttir, Steinunn Hauksdóttir, Guðni Axelsson, Magnús Ólafsson og Halldór Ármannsson (1999). *Ferilprófun á Mývatnssvæðinu*. Orkustofnun, OS-99028, 47 s.
- Jón Ólafsson (1979a). *Physical characteristics of Lake Mývatn and River Laxá*. OIKOS, 32, 38–66.
- Jón Ólafsson (1979b). *The chemistry of Lake Mývatn and River Laxá*. OIKOS, 32, 82–112.
- Jón Ólafsson (1991). Undirstöður lífríkis í Mývatni. Í Arnþór Garðarsson og Árni Einarsson (ritstj.), *Náttúra Mývatns*. Hið íslenska náttúrufræðifélag, 141–165.
- Kristján Sæmundsson (1991). Jarðfræði Kröflukerfisins. Í Arnþór Garðarsson og Árni Einarsson (ritstj.), *Náttúra Mývatns*. Hið íslenska náttúrufræðifélag, 25–95.

- Kristján Sæmundsson og Þórólfur H. Hafstað (2007). *Norðausturgosbeltið. Grunnvatn, bergskrokkar og misleitni. Framlag til grunnvatnslíkans af gosbeltinu norðan við Kröflu. Íslenskar orkurannsóknir, greinargerð, ÍSOR-07072. 13 s.*
- Opfergelt, S., Eiríksdóttir, E. S., Burton, K. W., Einarsson, A., Siebert, C., Gíslason, S. R. og Halliday, A. N. (2011). Quantifying the impact of freshwater diatom productivity on silicon isotopes and silicon fluxes: Lake Myvatn, Iceland. *Earth and Planetary Science Letters* 305, 73–82.
- Reglugerð um varnir gegn mengun vatns nr. 796/1999 með áorðnum breytingum 533/2001.*
- Reglugerð um neysluvatn nr. 536/2001 með áorðnum breytingum 145/2008.*
- Sigríður Sif Gylfadóttir, Sæunn Halldórsdóttir og Guðni Axelsson (2011). *Jarðhitakerfið í Námafjalli. Kvörðun reiknilíkans og spá um viðbrögð við 45 og 90 MWe rafmagnsframleiðslu. Íslenskar orkurannsóknir, ÍSOR-2011/036, Landsvirkjun, LV-2011/079, 58 s.*
- Trausti Hauksson (2013). *Krafla Bjarnarflag. Afköst borhola og efnainnihald vatns og gufu í borholum og vinnslurás 2012. Landsvirkjun, LV-2013-073, 73 s.*
- Verkfræðistofan Vatnaskil (1999). *Mývatn. Grunnvatnslíkan af vatnasviði Mývatns. Verkfræðistofan Vatnaskil, 99.10, 17 s. og 66 myndir.*
- Verkfræðistofan Vatnaskil (2008). *Norðausturland. Lokaskýrsla um gerð grunnvatnslíkans í gosbeltinu norðan við Kröflu. Verkfræðistofan Vatnaskil, 08.03, 16 s. og 53 myndir.*
- Þorvaldur Thoroddsen (útg.) (1097–1915). *Safn til sögu Íslands og íslenzkra bókmennta 4. Bd. bls. 385–411.*
- Þóroddur F. Þóroddsson (1980). *Hitamælingar í lindum og gjám við austanvert Mývatn. Orkustofnun, greinargerð, ÞFP-80/09, 7 s.*
- Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson (1983). *Kísiliðjan við Mývatn. Grunnvatnsrannsóknir. Orkustofnun, OS-83118/VOD-10, 42 s.*



Landsvirkjun

Háaleitisbraut 68
103 Reykjavík
landsvirkjun.is

landsvirkjun@lv.is
Sími: 515 90 00

