



ORKUSTOFNUN

RANNSÓKNASVIÐ - Reykjavík, Akureyri

Förgun affallsvatns frá Kröflu- og Bjarnarflagsvirkjunum



Halldór Ármannsson

Unnið fyrir Landsvirkjun

2003

OS-2003/032



ORKUSTOFNUN
Rannsóknasvið

Verknr.: 8-630656

Halldór Ármannsson

Förgun affallsvatns frá Kröflu- og Bjarnarflagsvirkjunum

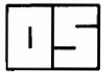
Unnið fyrir Landsvirkjun


OS-2003/032

Maí 2003

ORKUSTOFNUN – RANNSÓKNASVIÐ

Reykjavík: Grensásvegi 9, 108 Rvk. – Sími: 569 6000 – Fax: 568 8896
Akureyri: Rangárvöllum, P.O.Box 30, 602 Ak. – Sími: 460 1380 – Fax: 460 1381
Netfang: os@os.is – Veffang: <http://www.os.is>



Skýrsla nr.: OS-2003/032	Dags.: Maí 2003	Dreifing: <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: Förgun affallsvatns frá Kröflu- og Bjarnarflagsvirkjunum	Upplag: 30	
	Fjöldi síðna: 32	
Höfundar: Halldór Ármannsson	Verkefnisstjóri: Ásgrímur Guðmundsson	
Gerð skýrslu / Verkstig: Grunnvatnsrannsóknir, rennsli affalls, yfirlit	Verknúmer: 8-630656	
Unnið fyrir: Landsvirkjun		
Samvinnuaðilar:		
Útdráttur: <p>Lýst er sögu hugmynda og aðgerða varðandi förgun affallsvatns frá Kröflu- og Námafjallssvæðum frá upphafi. Mestöllu hefur verið fargað beint ofan í hraun og sýna athuganir að gífurleg þynning verður við blöndun við grunnvatn og nánast engin hættu á að hættuleg efni geti borist til Mývatns. Gerðar hafa verið tilraunir með djúpförgun og virðist sú leið heppileg ef ekki gengur að farga öllu í hraunið. Hún er dýr en hefur þann kost að halda uppi þrýstingi í jarðhitakerfinu.</p>		
Lykilorð: Jarðhitavirkjun, grunnvatnsrennsli, ferilprófun, styrkur efna, líkan, eldvirkni	ISBN-númer:	
	Undirskrift verkefnisstjóra: 	
	Yfirfarið af: ÁsG, Árni Gunnarsson	

EFNISYFIRLIT

1.	INNGANGUR	7
2.	UPPHAFLEGAR HUGMYNDIR OG AÐGERÐIR Á ÖÐRUM SVÆÐUM.....	7
2.1.	Forsaga.....	7
2.2.	Aðgerðir á öðrum svæðum	10
3.	ATHUGANIR Á GRUNNVATNSRENNSLI	10
3.1.	Líkanhugmyndir	10
3.2.	Ferilprófanir 1980-1982.....	11
3.3.	Ferilprófanir 1998-1999.....	15
3.4.	Ferilprófun 2000	15
3.5.	Óbein ferilprófun 2002	15
3.6.	Samandregnar niðurstöður ferilprófana.....	15
4.	EFNASAMSETNING	19
4.1.	Eldri athuganir	19
4.2.	Eftirlit með affalli frá Kröflu og Námafjalli eftir virkjun.....	19
4.3.	Athugun á áhrifum eldvirkni á grunnvatn	19
4.4.	Athugun á efnaskiptum milli sets og vatns í Mývatni	20
4.5.	Samanburður milli mælinga	20
4.6.	Samanburður við önnur svæði	20
5.	NIÐURDÆLING.....	24
6.	AÐGERÐIR.....	26
7.	HEIMILDIR.....	29

TÖFLUR

Tafla 1.	<i>Stóragjá, Grjótagjá. Hitastig, klóríð, kísill 1949-1998.</i>	21
Tafla 2.	<i>Styrkur sinks ($\mu\text{g/l}$) á nokkrum lykilstöðum 1976-2002.</i>	21
Tafla 3.	<i>Styrkur kopars ($\mu\text{g/l}$) á nokkrum lykilstöðum 1976-2002.</i>	21
Tafla 4.	<i>Styrkur nikkels ($\mu\text{g/l}$) á nokkrum lykilstöðum 1976-2002.</i>	22
Tafla 5.	<i>Styrkur kvikasilfurs ($\mu\text{g/l}$) á nokkrum lykilstöðum 1976-2002.</i>	22
Tafla 6.	<i>Styrkur arsens ($\mu\text{g/l}$) á nokkrum lykilstöðum 1976-2002.</i>	22

Tafla 7. Niðurstöður um mælingar snefilefna á þremur stöðum í Mývatni 2000-2001	23
Tafla 8. Umhverfismörk fyrir nokkur efni í yfirborðsvatni til verndar lífríki (Stjórnartíðindi B 1999).	23
Tafla 9. Samanburður á snefilefnastyrk skiljuvatns og lindarvatns frá Kröflu, Nesjavöllum (Wetang'ula 2002) og Svartsengi. Umhverfismörk I og II (tafla 9) eru sýnd til viðmiðunar.	24
Tafla 10. Tveir möguleikar á tilhögun eftirlits með grunnvatni í Mývatnssveit vegna affallsvatns frá Kröflu og Námafjalli.	28

MYNDIR

Mynd 1. Vatnasvið Hlíðardalslækjar.	9
Mynd 2. Grunnvatnsstreymi til Mývatns.	12
Mynd 3. Grunnvatnshæð á Kröflu-Námafjallssvæði.	13
Mynd 4. Reiknað grunnvatnsrennsli í nágrenni Mývatns.	14
Mynd 5. Mældur styrkur jodíðs með tíma í vatnssýnum úr Grjótagjá og Vogagjá.	17
Mynd 6. Breytingar á dýpi KG-26 með tíma og dæling í holuna eftir borun.	26
Mynd 7. Grunnvatnsrennsli í Búrfellshrauni og nágrenni. Sýndar eru borholur, lindir og gjár sem notaðar hafa verið til sýnatöku v/undirbúnings vöktunar-áætlunar.	18

1. INNGANGUR

Vegna mats á umhverfisáhrifum tengdu stækkun virkjunar og tilraunaborunum í Kröflu og fyrirhugaðri Bjarnarflagsvirkjun hefur töluvert verið fjallað um förgun affallsvatns að undanfögnu. Eru upplýsingar á við og dreif og var því ákveðið að draga helstu þætti málsins saman í eina yfirlitsskýrslu. Í þessari skýrslu eru raktar hugmyndir og aðgerðir varðandi förgun affallsvatns frá Kröflu og Námafjalli allt frá upphafi. Einnig er samantekt um þau gögn, sem til eru, túlkun þeirra og tillögur um framtíðarskipun förgunar affallsvatns og vöktun áhrifa hennar á umhverfið.

2. UPPHAFLEGAR HUGMYNDIR OG AÐGERÐIR Á ÖÐRUM SVÆÐUM

2.1. Forsaga

Í skýrslu Guttorms Sigbjarnarsonar o.fl. (1974) var áætlað að streymi affallsvatns frá Kröfluvirkjun eða Hverarandavirkjun yrði um $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ og helstu áhrif á umhverfi yrðu gufumökkur og kísilútfellingar. Brennisteinsvetni var nefnt sem hugsanlegur skaðvaldur en vegna rokgirni og hvarfgirni voru engar líkur taldar á að það geti borist til Mývatns. Þá voru taldar líkur á að nokkurt fosfat gæti borist með vökvanum og þá haft örvandi áhrif á gróður í Mývatni. Niðurstaðan var sú að láta affallsvatnið síga niður í Búrfellshraun og voru eftirfarandi rök gefin:

- ✓ Ódýrasta leiðin.
- ✓ Mikil þynning.
- ✓ Vatn lengi á leið til Mývatns, ef það þá nær þangað yfirleitt.

Mælt var með að boraðar yrðu holur niður í grunnvatnsborð Búrfellshrauns og tekin þar sýni áður en virkjunin tæki til starfa og reglulega eftir það. Leiði mælingar í ljós hættu á mengun mætti bregðast við því á þrennan hátt:

- ✓ Auka kælingu vatnsins og fella hugsanlega út skaðleg efni.
- ✓ Veita vatninu yfir á vatnasvið Jökulsár á Fjöllum.
- ✓ Dæla affallsvatninu niður í holur sem boraðar yrðu rétt utan heitasta svæðisins.

Í skýrslu um niðurstöður rannsóknarborana (Kristján Sæmundsson o. fl. 1975) er mælt með þeim kosti að kæla affallsvatnið, láta brennisteinsvetni rjúka og útfellingar myndast í lóni, helst staðsettu í Þríhyrningadal. VST og Virkir (1975) komust að raun um að lón í Hlíðardal yrði rekstrarlega og tæknilega mun hagstæðari kostur en lón í Þríhyrningadal. Helgi Hallgrímsson (1975) taldi lónin ekki góða kosti, þar eð þau myndu veita vatni til Mývatns en vildi láta kanna nánar möguleika á því að veita affallsvatninu yfir á vatnasvið Jökulsár á Fjöllum.

Stefán Arnórsson og Einar Gunnlaugsson (1976) skiptu Kröflusvæðinu í 3 vatnasvið, I, II og III (mynd 1) en telja ekki ljóst hvort grunnvatn af svæðum II og III eigi afrennsli í svæði I. Vatnasvið Hlíðardalslækjar geti því spannað frá 21–41 km². Auk þess er sjálfstætt vatnasvið vestan við, sem skilgreina má sem vatnasvið IV. Hlíðardalslækur er skilgreindur sem dragá og hefur leirframburður þétt botninn þannig að hann rennur í eins konar leirstokk ofan grunnvatnsborðs. Þar sem land verður flatt sest leirinn til og vatn rennur ofan í hraun. Líklegt er talið að grunnvatnsstraumur frá hrauninu sameinist vatnasviði, sem nær vestur fyrir Leirhnúkshraun og suður í Ytri Flóa, og er niðurstaðan sú að minni breyting verði á náttúrlegu ástandi með því að sameina affallsvatn frá Kröfluvirkjun grunnvatni innan öskjunnar en að veita því út fyrir öskjuna. Náttúrlegt rennsli úr lindum að Hlíðardalslæk (Dallæk) mældist í september 1975 um 87 l/s og efnasamsetning vatns úr honum benti til blöndu af köldu grunnvatni og háhitavatni. Athuganir á jarðfræðilegum aðstæðum bentu til að afrennsli vatns úr lóni í Þríhyrningadal yrði vestan vatnaskila, á vatnasviði IV (mynd 1), og skilaði sér í Hlíðardal eða vestan Dal fjalls og er þá um 15 km leið fyrir það til Mývatns. Talið var líklegt að vatn svo langt að komið rynni frekar undir botn Mývatns en beint í vatnið. Affallsvatn úr lóni í Hlíðardal myndi hins vegar vera á vatnasviði Hlíðardals (I) og skila sér beint í Hlíðardalslæk (Dallæk). Jón Ingimarsson o.fl. (1976) skýrðu síðan frá líkanreikningum sem sýndu að mestar breytingar á grunnvatnshæð yrðu ef lón væri staðsett í Þríhyrningadal en einnig að þá væru mestar líkur á að vatnið hripaði aftur niður í jarðhitakerfið. Með stystu rennislíleið til Mývatns fannst að vatn yrði um 30 ár á leið þangað og hætta á mengun Mývatns af völdum affallsvatns frá Kröflu talin nær engin. Gerð var tillaga um rannsóknarborholu til að fylgjast með vatnsborði og efnainnihaldi. Stefán Arnórsson (1976) gerði könnun á örlögum kísils og brennisteins frá gufuborholum og notaði við hana affallsvatn frá Bjarnarflagi. Komst hann að raun um að brennisteinn tapaðist fljótt til andrúmslofts við geymslu í lóni og fá mætti kísil til að fjölliðast algerlega í lóni þar sem hitastig væri sem næst hitastigi grunnvatns. Með tilliti til Kröflu komst hann að raun um að hentugasta lónstæðið væri í Þríhyrningadal því að það lón myndi aldrei fyllast og vatn myndi stöðugt hripa niður eftir að lónið næði ákveðinni stærð.

Í skýrslum um upphaflega nýtingu Námafjallssvæðisins er lítið fjallað um frárennsli. Kristján Sæmundsson (1969) getur þess að í holum í Bjarnarflagi sé vatnsborðsstaða í holum ávallt mjög svipuð en vísar til eldri skýrslu þar sem athugað var vatnsborð í holu austan Námafjalls og sveiflaðist það á árstíðabundinn hátt milli 321 og 345 m y.s.

2.2. Aðgerðir á öðrum svæðum

Á Nesjavöllum hefur skiljuvatni fram til þessa verið fargað beint út í hraun en áhrif þess hafa komið greinilega fram í nokkrum lindum við Þingvallavatn (Jón Ólafsson 1992, Wetang'ula 2002). Kælivatni og þéttri gufu hefur um nokkurt skeið verið fargað um 50-100 m holur með góðum árangri. Í næsta áfanga virkjunarinnar verður bætt við kæliturnum og minnkar það umfang slíkrar förgunar. Undanfarið ár hafa verið gerðar tilraunir með tiltölulega grunna förgun skiljuvatns í um 600 m djúpar holur, sem eru fóðraðar í 400 m dýpi. Þær tilraunir hafa gefið góða raun og er reiknað með að hún verði framtíðarlausn í sambandi við förgun skiljuvatns á Nesjavöllum (Gestur Gíslason, pers. uppl.).

Í Svartsengi var affallsvatni upphaflega fargað beint út í hraun, en við það myndaðist stórt lón, Bláa lónið, sem hefur orðið vinsæll ferðamannastaður. Frá 1982 og fram á 10. áratug 20. aldar voru gerðar tilraunir með niðurdælingu í svæði. Í fyrstu var dælt niður köldu, steinefnasnaudu grunnvatni og þótti það gefa góða raun varðandi forða og líftíma svæðisins. Síðar voru gerðir útreikningar og tilraunir um mögulega niðurdælingu skiljuvatns, sem er verulega salt og því töluverð útfellingahætta. Í ljós kom að óhætt væri að dæla niður blöndu af skiljuvatni og þéttri gufu og voru gerðar tilraunir með slíka niðurdælingu sem tókust vel og er niðurdæling nú hluti af lausn á förgun affallsvatns frá Svartsengi. Magn þéttrar gufu takmarkar hve miklu er unnt að dæla niður en á móti kemur að Bláa lónið þarf verulegt magn af skiljuvatninu til sinnar starfsemi. Árið 2002 var dælt niður 1,72 milljón tonnnum í Svartsengi eða um 15% af heildarvinnslu úr svæðinu, sem var 12,06 milljón tonn (Verkfræðistofan Vatnaskil o.fl. 2003).

3. ATHUGANIR Á GRUNNVATNSRENNSLI

3.1. Líkanhugmyndir

Björn Jóhannesson (1977) gerði grein fyrir mælingum Trausta Eiríkssonar á rennsli og hitastigi grunnvatns á Námafjallssvæði og tengdi þær niðurstöðum Braga Árnasonar (1976) og upplýsingum frá Sigurjóni Rist og Jóni Jónssyni til að fá heildarmynd af grunnvatnsstreymi á svæðinu. Taldi hann meginvatnsstrauminn kominn frá Dyngju-fjallasvæðinu, en hann skiptist síðan og færi einn straumur norður eftir Kröflusprungukerfinu en annar eftir Þeistareykjasprungukerfinu og til sjávar í Öxarfirði. Við Námafjall og Kröflu hitnaði svo Kröflustraumurinn og hluti vatnsins stigi upp og rynni til suðurs til Mývatns. Volgi og kaldi straumurinn mættust svo á Auðnasvæðinu (mynd 1) við Mývatn. Síðar athugaði Björn Jóhannesson (1980) áhrif Kröfluelda á strauminn og tók til greina niðurstöður Jóns Ingimarssonar o.fl. (1976) og Freys Þórarinssonar og Bárú Björgvinsdóttur (1980) um kalt grunnvatnsstreymi frá Kröflu til Mývatns vegna þétts bergs er gerir grunnvatnshæð óháða grunnvatnspegli Mývatns en þess í stað fylgir hún nokkurn veginn landhæð. Þau síðarnefndu beittu viðnámsmælingum. Er þá komin fram í stórum dráttum sú heildarmynd er menn hafa stuðst við síðan. Samsætumælingar Darling og Ármannssonar (1989) staðfesta staðbundinn uppruna jarðhitavatns í Kröflu en að vatn í Námafjallsjarðhitakerfinu sé ættað langt sunnan að. Afleiðing umbrotanna var að blöndunarbelti volgu og köldu vatnsstraumanna við Auðnir færðist til suðurs.

Sömu megindrættir koma fram í grunnvatnskorti Þórodds F. Þóroddssonar og Guttorms Sigbjarnarsonar (1983) (mynd 2). Þó má sjá finni drætti í þeirra niðurstöðum, einkum að grunnvatnsstreymi norðan Jarðbaðshóla leitar að mestu til Helgavogs og Kálfstjarnar en grunnvatnsstreymi frá sunnanverðum Jarðbaðshólum til Vogaflóa. Lítið rennsli virðist vera frá Kísiliðjunni og suður í Grjótagjá.

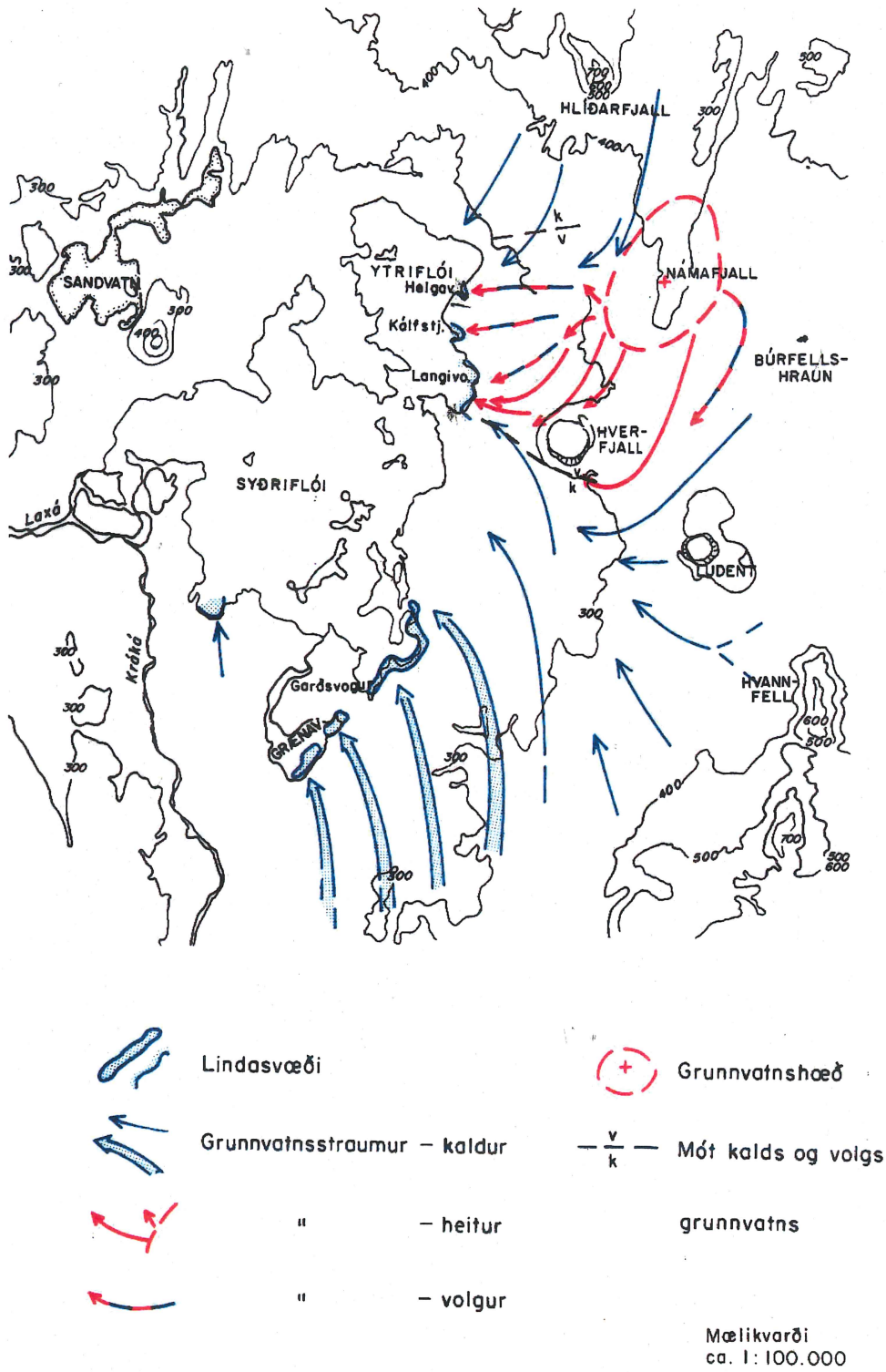
Halldór Ármannsson o.fl. (1998) notuðu allar tiltækar vatnsborðsmælingar og upplýsingar úr skrifum Guttorms Sigbjarnarsonar o.fl. (1974), Stefáns Arnórssonar og Einars Gunnlaugssonar (1976), Jóns Ingimarssonar o.fl. (1976), Björns Jóhannessonar (1977, 1980), Freys Þórarinssonar og Báru Björgvinsdóttur (1980), Þórodds F. Þóroddssonar og Guttorms Sigbjarnarsonar (1983), Eric de Zeeuw og Gestis Gíslasonar (1988), Friedman o.fl. (1963), Braga Árnasonar (1976) og Darling og Ármannssonar (1989) til að gera vatnshæðarkort af svæðinu frá Kröflu að Mývatni (mynd 3). Þar kemur fram að rennsli frá Kröflu gæti runnið austan Mývatns og þá hugsanlega sameinast norðurstraumi í átt að Hólmatungum.

Verkfræðistofan Vatnaskil (1999) setti upp allviðamikið líkan af grunnvatnsstreymi í Mývatnssveit (mynd 4). Er þar komin nokkuð heildstæð mynd þó að sumir finni drættir líkansins hafi verið gagnrýndir einkum streymi í næsta nágrenni Námafjalls. Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2002) leggja til að allákveðið streymi sé frá Bjarnarflagi til Mývatns m.a. vegna þess að þar á leiðinni sjást gufur sem hljóta að eiga uppruna í jarðhitavatni (Halldór Ármannsson og Kristján Sæmundsson 2003).

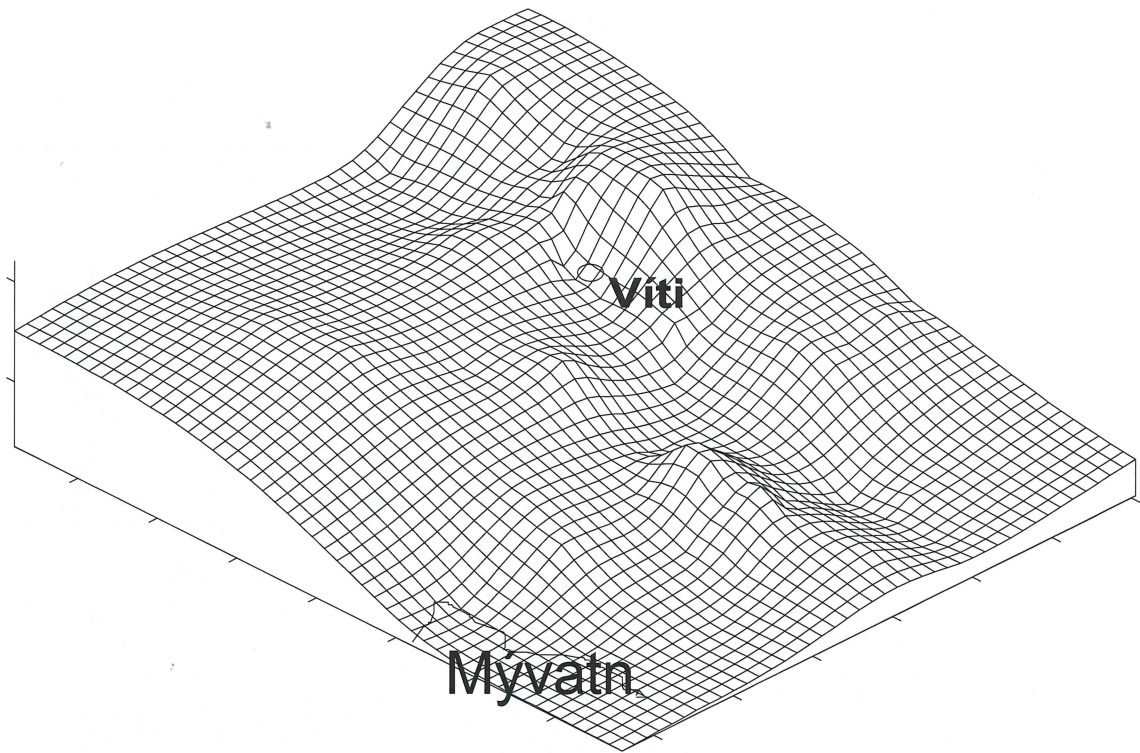
3.2. Ferilprófanir 1980–1982

Árið 1980 lét Jón Ólafsson setja flúóroscein í niðurrennsli um 190 m norðaustur af holu AB-02 í Búrfellshrauni og virtist megnið skila sér í holuna á um 40 dögum (Jón Ólafsson og Þóroddur F. Þóroddsson, persónulegar upplýsingar). Árin 1981 og 1982 var flúórosceini hellt saman við affallsvatn frá dælustöðinni við Helgavog, um 1 km frá botni Helgavogs (Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson 1983). Litar-efnið dreifðist bæði til hliðar við og í straumstefnu og kom mest svörun fram í Helgavogi en efnisins varð og vart í Stórugjá og Kálfstjörn. Líkur voru leiddar að því að mjög lítill hluti rennslisins gæti borist til Grjótagjár og þaðan til Langavogssvæðisins.

VOÐ-AL-472-FS/SPS
'84.03.0424-EK



Mynd 2. Grunnvatnsstreymi til Mývatns (Þóroddur F Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson 1983).



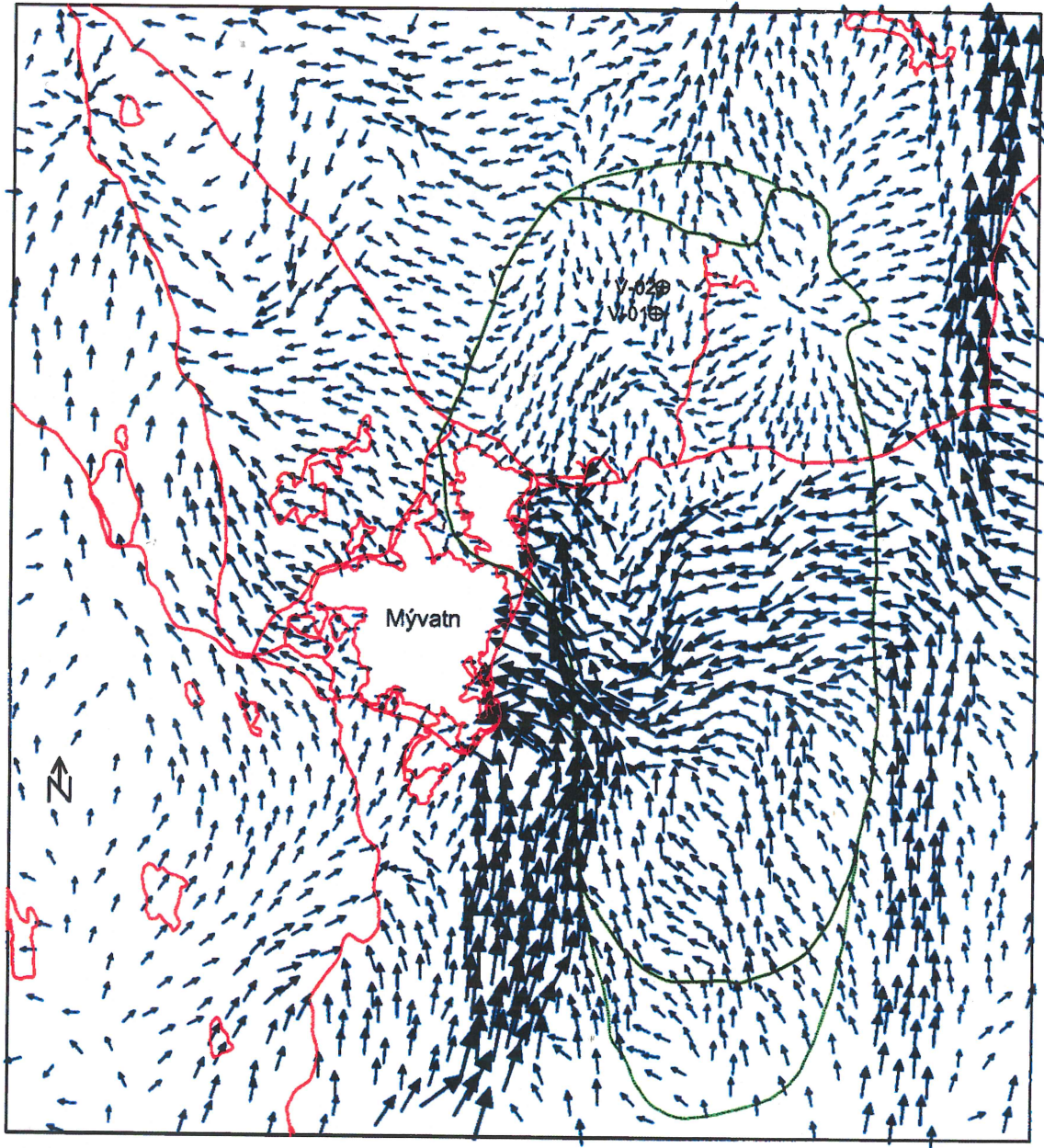
Mynd 3. *Grunnvatnshæð á Kröflu-Námafjallssvæði (Halldór Ármannsson o.fl. 1998).*

VATNASKIL

MÝVATN

LANDSVIRKJUN

Reiknað grunnvatnsrennsli



Mkv. 1:200.000



Mynd 4. Reiknað grunnvatnsrennsli í nágrenni Mývatns (Verkfræðistofan Vatnaskil 1999).

3.3. Ferilprófanir 1998–1999

Árið 1998 voru gerðar tilraunir með að setja flúoróscein fyrst niður í svelt þar sem Hlíðardalslækur (Dallækur) endar og rhódamín WT í svelt frá lóninu í Bjarnarflagi. Þá var sett niður kalíumjoðið í Bjarnarflagssveltinn síðar og loks flúoróscein á sama stað í byrjun janúar 1999 (Hrefna Kristmannsdóttir o.fl. 1999). Í fyrri prófununum komu hvorki flúoróscein né rhódamín WT fram, en eftir 4 mánuði fór joðið að greinast í Grjótagjá. Lokaflúorósceinprófunin sýndi óljósa smápúlva í byrjun í Grjótagjá en marktæk aukning kom ekki fram sunnar.

3.4. Ferilprófun 2000

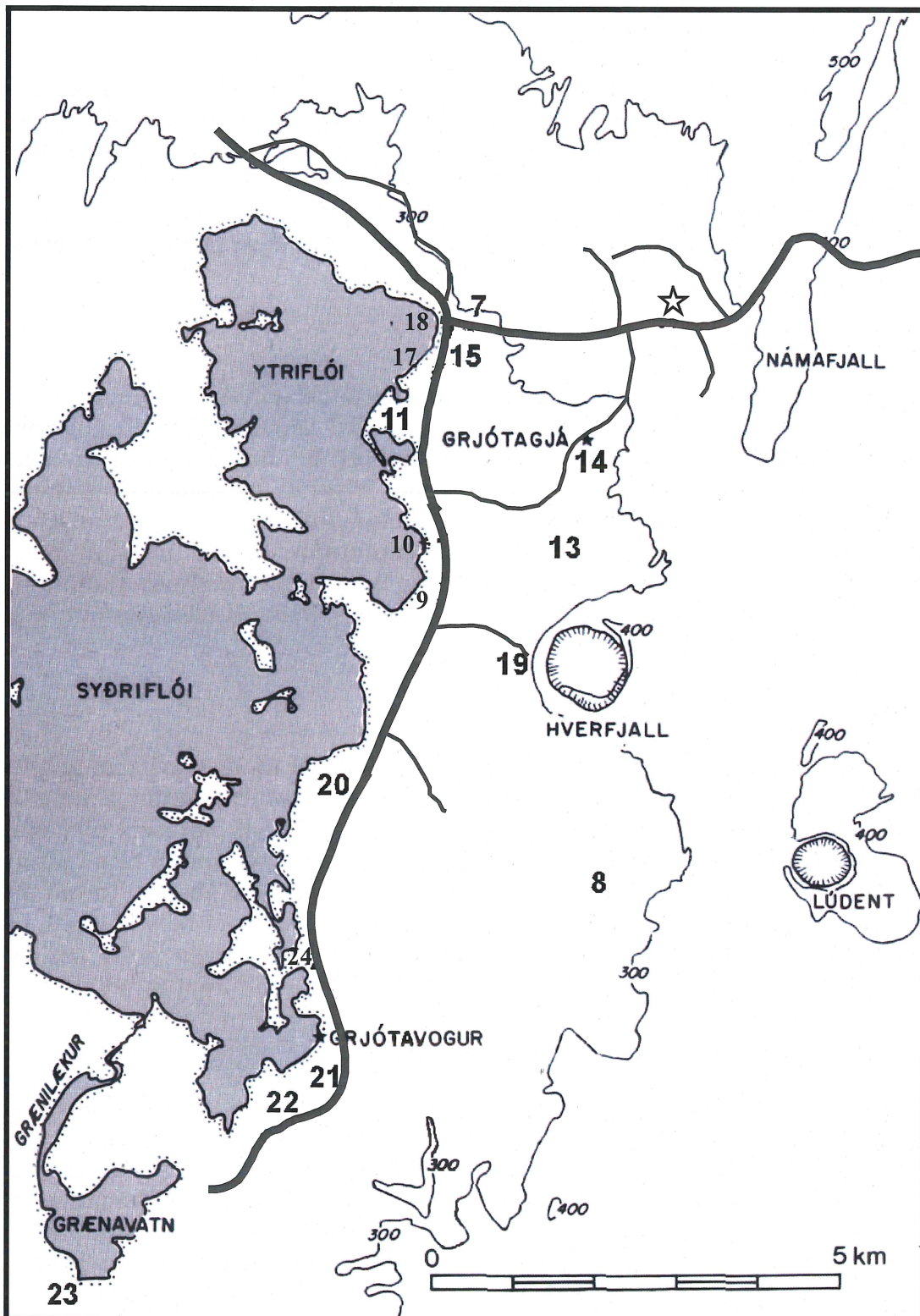
Kalíumjoðið var aftur sett niður í Bjarnarflagssveltinn sumarið 2000. Í þeirri prófun voru sett niður 200 kg af kalíumjoðið í sveltinn frá affallslóninu í Bjarnarflagi á sama stað og 1998 en tvöfalt meira. Fylgst var með gjám, borholu í hrauninu suður og vestur af Bjarnarflagi, í uppsprettulindum við austurströnd Mývatns og sunnan Grænavatns. Sýnatökustaðirnir eru sýndir á mynd 5. Kom ferilefnið fram í Grjótagjá eftir u.þ.b. 2 mánuði en náði hámarki þar eftir um 5 mánuði. Nokkru síðar kom örlítið magn fram í Vogagjá nokkru sunnar, en hvergi annars staðar, þótt fylgst væri með í um 2 ár. Reiknast þynning til Grjótagjár u.þ.b. 100 miljónföld (Hrefna Kristmannsdóttir o.fl. 2001) (mynd 6).

3.5. Óbein ferilprófun 2002

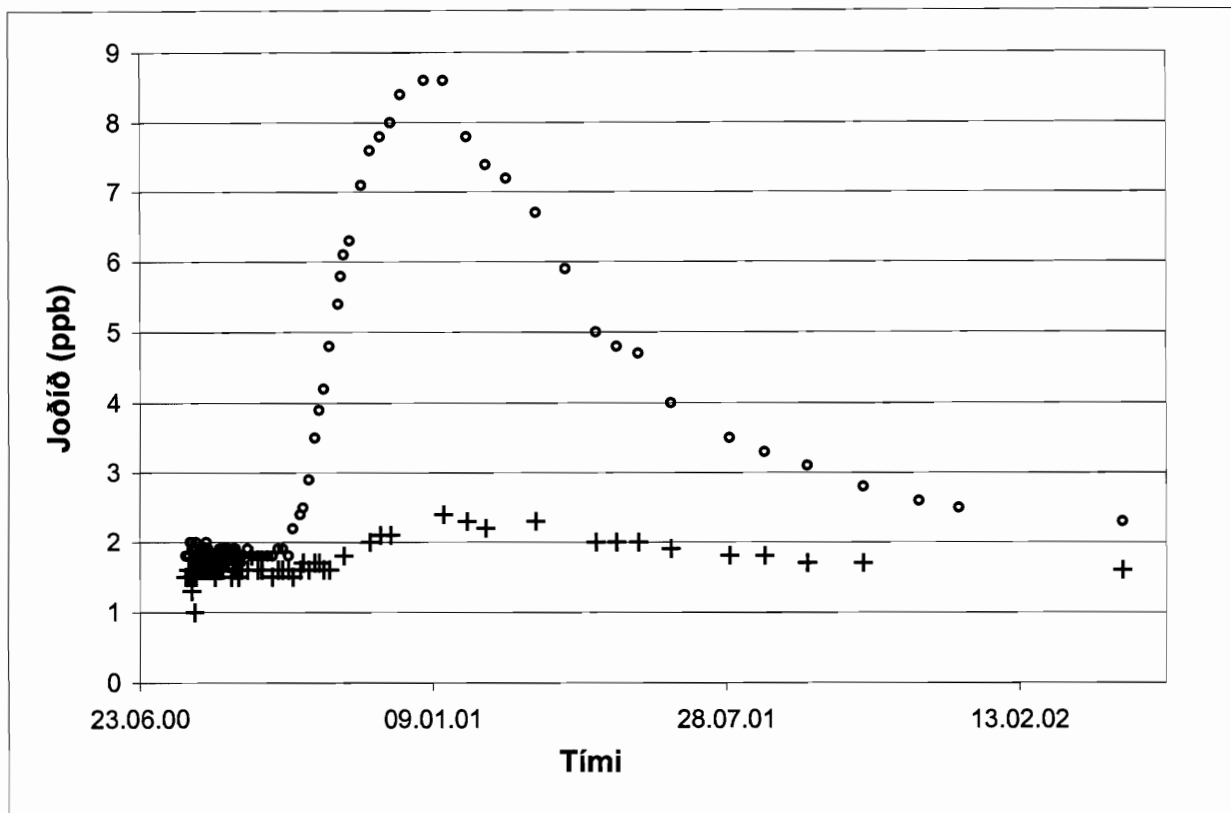
Í september 2002 var gerð tilraun til að kanna streymi affalls frá Kröfluvirkjun sem fer um Hlíðardalslæk niður í Búrfellshraun. Ekki þótti ástæða til að nota sérstök ferilefni til að rekja streymisleiðir grunnvatnsins heldur var fylgst með styrk nokkurra snefilefna sem einkenna affallsvatnið, sér í lagi arsens. Fylgst var með styrk þessara efna í holum LUD-01-05, Grjótagjá, Hverfjallsgjá og lindum við austanvert Mývatn (mynd 7). Niðurstöður voru þær að rennsli er frá niðurfalli Hlíðardalslækjar til holu LUD-04, og e.t.v. lítils háttar rennsli að holu AB-02, en nær Mývatni sjást engin merki um það (Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson 2002).

3.6. Samandregnar niðurstöður ferilprófana

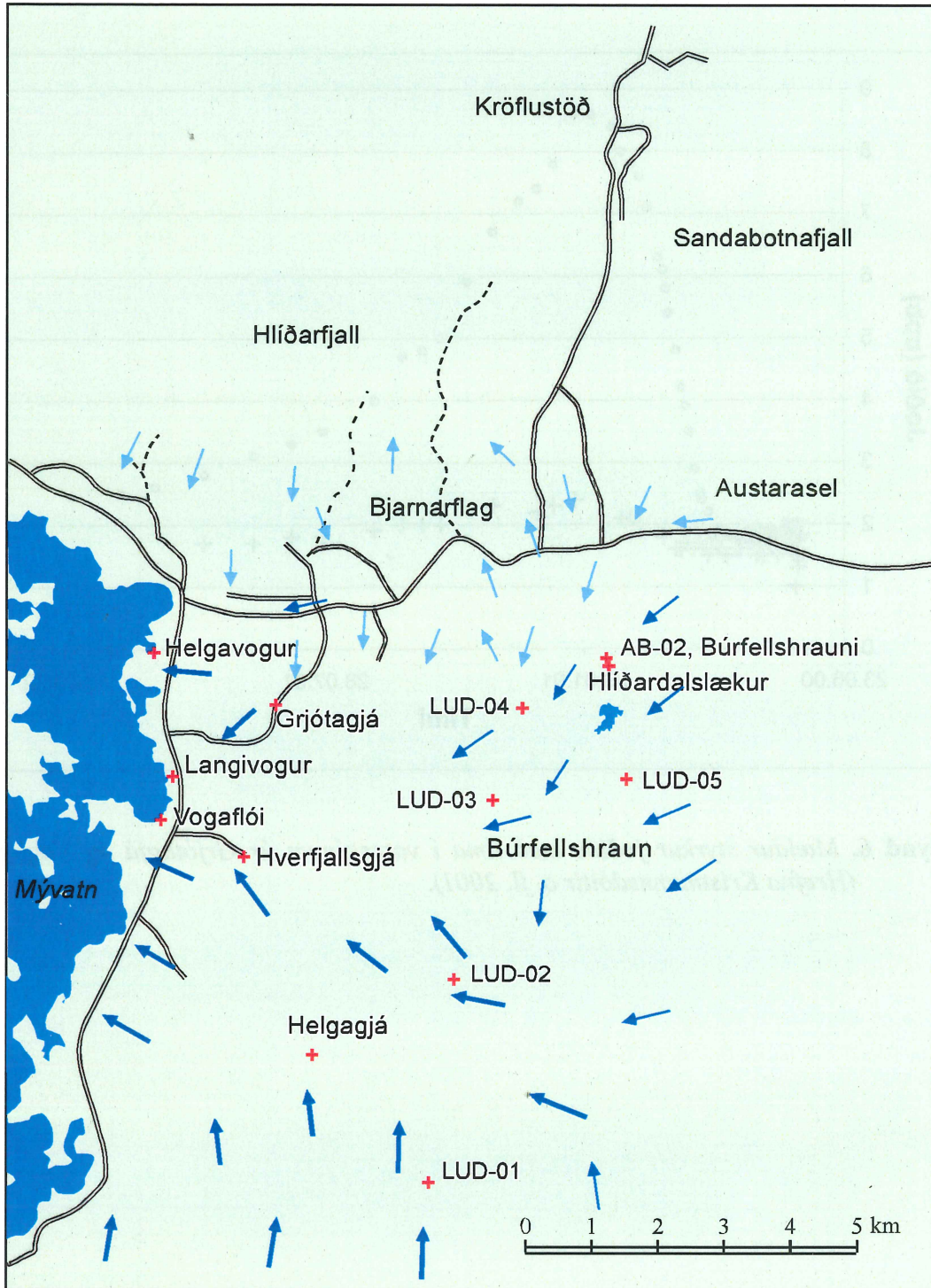
Í heildina virðast þessar ferilprófanir leiða í ljós að grunnvatnsstreymi er mikið og veruleg þynning verður á vatni sem blandast því. Einhver hluti þess vatns sem sett er niður í Bjarnarflagssveltinn fer til vesturs í átt að Mývatni og annar hluti til suðurs eftir gjánum. Nokkurt streymi til vesturs virðist vera frá niðurfalli Hlíðardalslækjar (Dallækjar). Í ferilprófunum hefur í engu tilviki verið unnt að rekja streymi áfram til nágrennis við Mývatn. Hætta á mengun Mývatns af völdum affallsvatns frá virkjunum í Kröflu og Bjarnarflagi er því hverfandi.



Mynd 5. Sýnatökustaðir í ferilprófun 2000–2001 (Nr. 7-11, 13-15 og 16-23). Niðursetningar- staður er merktur með stjörnu (Hrefna Kristmannsdóttir o. fl. 2001).



Mynd 6. Mældur styrkur jodíðs með tíma í vatnssýnum úr Grjótagjá og Vogagjá (Hrefna Kristmannsdóttir o. fl. 2001).



Mynd 7. Grunnvatnsrennsli í Búrfellshrauni og nágrenni. Sýndar eru borholur, lindir og gjár sem notaðar hafa verið til sýnatöku v/ undirbúnings vöktunar-áætlunar (byggt á grunnvatnslikani Verkfræðistofunnar Vatnaskila, Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson 2002)

4. EFNASAMSETNING

4.1. Eldri athuganir

Vatnsborð háhitakerfanna í Kröflu og Námafjalli liggur á miklu dýpi og við náttúrlegar aðstæður kemst eingöngu gufa til yfirborðs þaðan. Eins og lýst er hér að ofan hitnar grunnvatn á Námafjallssvæðinu og má komast að því í gjám og lindum við Mývatn. Fyrstu jarðhitavatnssýnum til efnagreininga af Námafjallssvæði, sem vitað er um, var safnað 1949 (Jarðboranir ríkisins 1951). Vatnamælingar söfnuðu nokkrum sýnum úr tveimur lindum á bakka Mývatns 1955–1964 (Jón Ólafsson 1979) og einnig gerði Unnsteinn Stefánsson (1970) nokkrar athuganir á sömu lindum og Mývatni sumarið 1969. Reglulegar athuganir á efnafræði vatns í Stórugjá og Grjótagjá hófust 1972 á vegum Orkustofnunar, og Jón Ólafsson (1979) gerði athuganir á vatni í lindum og gjám og Mývatni sjálfu einkum m.t.t. næringarsalta en birti og niðurstöður um styrk nokkurra snefilefna.

4.2. Eftirlit með affalli frá Kröflu og Námafjalli eftir virkjun

Eftir boranir í Námafjalli og síðar Kröflu hófst sýnataka úr borholum til eftirlits en langflestar eru þær til efnagreininga á aðalefnum en sumar eingöngu til hlutgreininga. Björn Þór Guðmundsson og Stefán Arnórsson (2002) gerðu yfirlit um það eftirlit fram til ársins 2000. Í nokkrum tilvikum hefur þá verið safnað sýnum af affallsvatni auk sýna af holuvatni. Jón Ólafsson (1978) mældi styrk kvikasilfurs og arsens í vökva nokkurra borholna í Kröflu og Námafjalli og eru það grundvallarniðurstöður fyrir síðari tíma athuganir. Þó verður að hafa í huga að mælingarnar voru gerðar meðan Kröflueldar voru í gangi og kvikugasstreymi í miklu magni svo að búast má við háum gildum. Kvikasilfur var nokkrum sinnum mælt á níunda áratugnum og fengust svipuð eða heldur hærri gildi (0.0005 til 0.0015 mg/l) í borholuvökva í Kröflu og Námafjalli en 1976 og 1977. Annars hefur styrkur snefilefna ekki verið mældur vegna eftirlits með borholum á svæðunum.

4.3. Athugun á áhrifum eldvirkni á grunnvatn

Halldór Ármannsson o.fl. (1998) sáu um söfnun sýna úr Hlíðardalslæk (Dallæk), gjám og lindum á tveggja mánaða fresti í rúmt eitt ár og voru allmörg snefilefni mæld í þeim. Loks hafa nokkrar efnagreiningar verið gerðar á Hlíðardalslæk (Dallæk) og aðrennsli hans á síðustu árum auk þess sem gerð var athugun á grunnvatnsrennsli í Búrfellshrauni og nágrenni og flutningi og þynningu arsens þar eftir að boraðar höfðu verið nokkrar holur til þess að fylgjast með affallsvatni (Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson 2002). Yfirlit um klór og kísil í Stórugjá kemur fram í töflu 1 og sýnir breytingar af völdum umbrota og hæga nálgun til fyrra horfs. Athyglisverð er breyting á klóríðstyrk sem bendir til blöndunar við annars konar vatn á eldsumbrotatímabilinu, meðan kísilstyrkbreytingar má rekja til breytinga á hitastigi. Á sama hátt er borinn saman styrkur nokkurra snefilefna á nokkrum lykilstöðum á svæðinu í töflum 2–6 og bendir sú

samantekt ekki til þess að aukning hafi orðið þrátt fyrir að mikið affallsvatn (um 200 miljón tonn) hafi runnið frá Kröflu og Námafjalli á þessum tíma.

4.4. Athugun á efnaskiptum milli sets og vatns í Mývatni

Ingunn María Þorbergsdóttir (2002) gerði fjölda mælinga á snefilefnum á þremur stöðum í Mývatni. Yfirleitt mældust mjög lág gildi eins og sést í töflu 7 um nokkur snefilefni, þó að í sumum tilfellum eða u.þ.b. 30% færi sink fram úr umhverfismörkum II (tafla 8). Sú tímabundna aukning, sem stundum kemur fram, stafar að öllum líkindum af breytingum á lífríki, þ.e. dauða lífvera og leysingu efna við rotnun, en ekki af mengun.

4.5. Samanburður milli mælinga

Þar sem mælt hefur verið á sama stað 1976 og aftur 1997–2002 gildir að verulega hærra mæligildi fengust fyrir Zn, Ni og As 1976 heldur en síðar meir. Koparstyrkur mældist mjög svipaður. Kvikasilfursstyrkur er misvísandi og gæti verið of lágur 2002 vegna annarrar söfnunaraðferðar. Í hinum tilfellunum er líklega um aðferðamun að ræða og má gera ráð fyrir að hinar nýrri aðferðir séu áreiðanlegri en hinar eldri. Samantekt þessi bendir ekki til þess að aukning hafi orðið í styrk ofangreindra snefilefna þrátt fyrir að mikið affallsvatn (um 200 miljón tonn) hafi runnið frá Kröflu og Námafjalli á þessum tíma.

4.6. Samanburður við önnur svæði

Í töflu 9 er gerður samanburður á snefilefnastyrk í skiljuvatni frá Kröflu, Námafjalli, Nesjavöllum og Svartsengi og í vatni úr lind í hverju hrauni. Ljóst er að mikil þynning verður á skiljuvatni frá Kröflu, Námafjalli og Svartsengi áður en það nær lindum þeim sem athugaðar eru. Hins vegar virðist í sumum tilvikum jafnvel um styrkingu að ræða á Nesjavöllum.

Tafla 1. Stóragjá, Grjótagjá. Hitastig, klóríð, kísill 1949–1998.

Ár	Stóragjá			Grjótagjá		
	t°C	Cl mg/kg	SiO ₂ mg/kg	t°C	Cl mg/kg	SiO ₂ mg/kg
1949	26	16	80	45	21	111
1976		17.9	75		20.5	111
1978	30.0	27.5	115	57	20.3	183
1980	40.2	26.2	127	56.4	19.9	162
1982	36.9	31.1	132	54.4	29.7	198
1984	35.8	25.5	136	52.7	27.9	198
1985	35.3	25.6	123	51.4	19.2	181
1998	35.7	12.1	89.4	47.3	17.4	153

Tafla 2. Styrkur sinks ($\mu\text{g/l}$) á nokkrum lykilstöðum 1976–2002.

Ár	Helga- vogur	Langi- vogur	Grjóta- gjá	Bjarnar- flag H-4	Hlíðar- dals- lækur	Bjarnar- flag lón	Laxá
1976	3.5	2.4	2.2	0.9			1.5
1997	<0.1	3.1	0.1		1.7	4.0	
2001					2.1		
2002	1.1	0.6	1.3		8.1		

Tafla 3. Styrkur kopars ($\mu\text{g/l}$) á nokkrum lykilstöðum 1976–2002.

Ár	Helga- vogur	Langi- vogur	Grjóta- gjá	Bjarnar- flag H-4	Hlíðar- dals- lækur	Bjarnar- flag lón	Laxá
1976	1.2	0.5	<0.4	<0.4			0.4
1997	0.8	3.7	0.1		2.3	1.9	
2001					2.1		
2002	1.1	0.3	0.5		1.2		

Tafla 4. Styrkur nikkels ($\mu\text{g/l}$) á nokkrum lykilstöðum 1976–2002.

Ár	Helga- vogur	Langi- vogur	Grjóta- gjá	Bjarnar- flag H-4	Hlíðar- dals- lækur	Bjarnar- flag lón	Laxá
1976	8.8	8.0	8.4	1.7			3.0
1997							
2001					0.7		
2002	0.3	0.1	0.2		0.6	0.2	

Tafla 5. Styrkur kvikasilfurs ($\mu\text{g/l}$) á nokkrum lykilstöðum 1976–2002.

Ár	Helga- vogur	Langi- vogur	Grjóta- gjá	Bjarnar- flag H-4	Hlíðar- dals- lækur	Bjarnar- flag lón
1976	0.0024	0.0041	0.0017	0.0346		
1997	<0.005					
2001					0.0296	
2002	<0.002	<0.002.	<0.002		0.008	0.012

Tafla 6. Styrkur arsens ($\mu\text{g/l}$) á nokkrum lykilstöðum 1976–2002.

Ár	Helga- vogur	Langi- vogur	Grjóta- gjá	Bjarnar- flag H-4	Hlíðar- dals- lækur í Búrfells- hrauni	Bjarnar- flag lón
1976		6.9	11.2	61		
1997	0.1	<0.1	<0.1		16.2	229
2001					24.1	
2002	0.16	0.15.	0.17		25.1	157

Tafla 7. Niðurstöður mælinga snefilefna á þremur stöðum í Mývatni 2000–2001.

Staður	As (µg/l)	Cu (µg/l)	Zn (µg/l)	Ni (µg/l)	Hg (µg/l)
Höfði	<0.03-0.28	0.2-0.9	<0.2-551	0.10-0.54	<0.002-0.03
Strandarbolir	<0.03-0.09	0.2-1.0	0.3-550	0.06-0.38	<0.002-0.04
Neslandavík	<0.03-0.13	0.1-1.2	<0.2-226	0.08-0.28	<0.002-0.03

Tafla 8. Umhverfismörk fyrir nokkur efni í yfirborðsvatni til verndar lífríki (Stjórnartíðindi B 1999).

Mörk mg/l	I	II	III	IV	V
Cu	≤ 0,0005	0,0005-0,003	0,003-0,009	0,009-0,045	>0,045
Zn	≤ 0,005	0,005-0,02	0,02-0,06	0,06-0,3	>0,3
Cd	≤ 0,00001	0,00001-0,0001	0,0001-0,0003	0,0003-0,0015	>0,0015
Pb	≤ 0,0002	0,0002-0,001	0,001-0,0003	0,003-0,015	>0,015
Cr	≤ 0,0003	0,0003-0,005	0,005-0,015	0,015-0,075	>0,075
Ni	≤ 0,0007	0,0007-0,0015	0,0015-0,0045	0,0045-0,0225	>0,0225
As	≤ 0,0004	0,0004-0,005	0,005-0,015	0,015-0,075	>0,075
P	≤ 0,02	0,02-0,04	0,04-0,09	0,09-0,15	>0,15

Skýringar við töflu 8:

Umhverfismörk I: Málmar: mjög lítil eða engin hættu á áhrifum; Næringarefni (P): Næringarfátækt.

Umhverfismörk II: Málmar: Lítil hættu á áhrifum; Næringarefni (P): Lágt næringarefnagildi.

Umhverfismörk III: Málmar: Áhrifa að vænta á viðkvæmt lífríki; Næringarefni (P): Næringarefnaríkt.

Umhverfismörk IV: Málmar: Áhrifa að vænta; Næringarefni (P): Næringarefnaauðugt.

Umhverfismörk V: Málmar: Ávallt ófullnægjandi ástand vatns fyrir lífríki/þynningarsvæði; Næringarefni (P): Ofauðugt.

Tafla 9. Samanburður á snefilefnastyrk skiljuvatns og lindarvatns frá Kröflu, Námafjalli, Nesjavöllum (Wetang'ula 2002) og Svartsengi. Umhverfismörk I og II (tafla 9) eru sýnd til viðmiðunar.

Virkjun	Staður	Zn µg/l	Cu µg/l	Ni µg/l	Hg µg/l	As µg/l
Krafla	Hlíðardalslækur	8.1	1.2	0.6	0.008	25.1
	Langivogur	0.6	0.3	0.1	<0.002	<0.1
Námafjall	Affallslón	2.6	0.7	0.2	0.012	157
	Langivogur	0.6	0.3	0.1	<0.002	0.15
Nesjavellir	Skiljustöð	1.9	<0.1	0.1	<0.002	20.9
	Grámelur	28.4	1.6	0.6	<0.002	3.8
Svartsengi	Skiljustöð	0	53	ekki mælt	0.003	144
	Gjá í Lágum	11.8	<0.1	<0.1	<0.003	<0.1
Umhverfismörk	I	5	0.5	0.7		0.4
	II	20	3	1.5		5

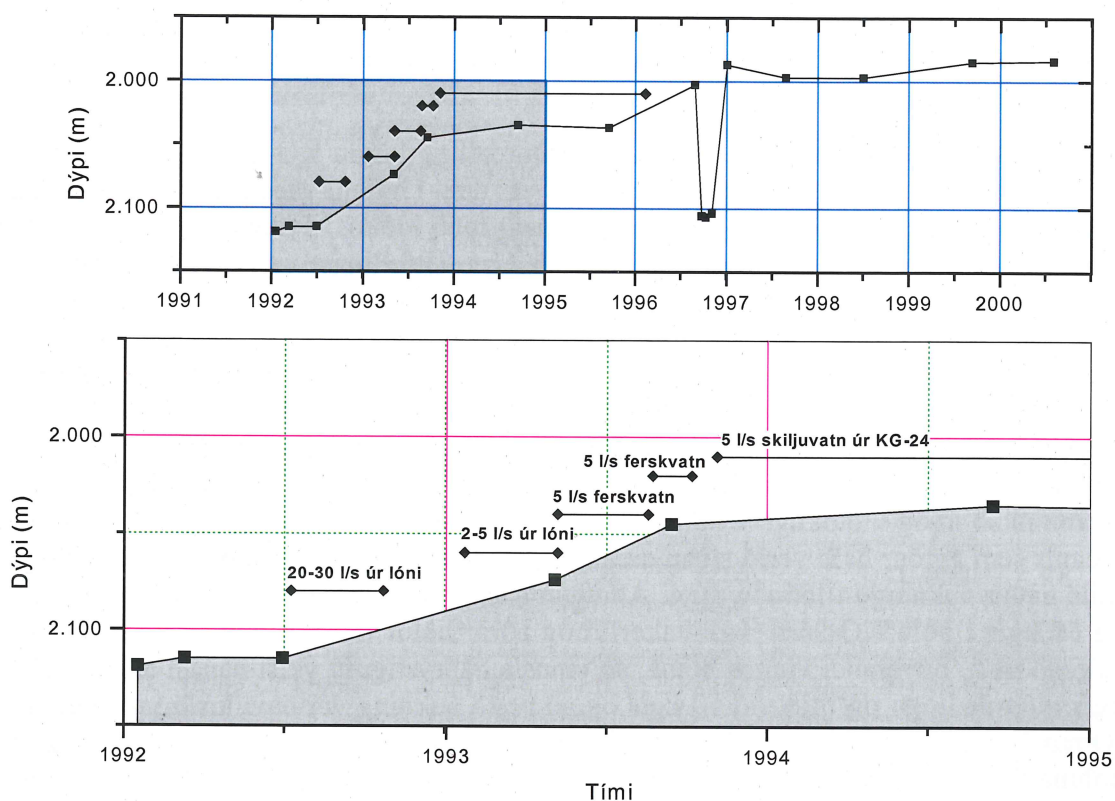
5. NIÐURDÆLING

Tvenns konar niðurdæling hefur verið nefnd til sögunnar, grunnförgun og djúpförgun. Einar Tjörvi Elíasson o.fl. (1998) fjölluðu í greinargerð um grunnförgun og komust að því að hún kæmi helst til greina um 100-200 m djúpar holur annaðhvort austan eða vestan til í Hlíðardal. Austan megin yrði affallsvatni fargað í stórt, hugsanlega vel lekt misgengi neðan við Skarðssel en vestan megin í svonefndan Grunnaskurð, misgengi er liggur utan í Dal fjalli að austan, gengur suður á Námafjall og er líklega mjög lekt. Væri síðari kosturinn valinn þyrfti að veita affalli frá Hlíðardalslæk (Dallæk) yfir ósnortið kjarlendi.

Ásgrímur Guðmundsson (2001) fjallaði ítarlega um athuganir, tillögur og reynslu vegna djúpförgunar. Í kjölfar upphaflegra hugmynda um dælingu vökva úr efrihluta Leirbotnakerfisins í þann neðri (Trausti Hauksson 1981) hefur mjög verið fjallað um hugsanlega niðurdælingu í Hvíthólasvæðið (Benedikt Steingrímsson og Halldór Ármannsson 1984, Halldór Ármannsson 1988, Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson 1989, Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson 1991, Ásgrímur Guðmundsson og Trausti Hauksson 1998, Stefán Arnórsson og Auður Andrésdóttir 1998, Stefán Arnórsson 1998). Ein niðurstaða var sú að líkanreikningar sýndu að niðurdæling í holu KJ-22 kæmi til með að lækka vermi KJ-21. Gerð var tilraun með niðurdælingu affallsvatns frá holu KJ-21 í holu KJ-22 frá hausti 1999 fram á árið 2000 og gerð ferilprófun með kalíumjodíði til að kanna afdrif vatnsins. Í ljós kom að meginhluti vatnsins fór ekki út um botnæðar holunnar heldur skilaði sér út í jarðhitakerfið á 600 til 1000 m dýpi og kom fram í holu

KJ-21 fáeinum dögum eftir að því hafði verið dælt niður. Eigi að dæla niður á Hvíthólasvæðinu þyrfti að fódra niðurdælingarholu niður fyrir 1000 m eða dæla því neðan 1000 m dýpis.

Annar fýsilegur kostur til djúpförgunar er niðurdæling í holu KG-26. Skolvatni úr lóni, ferskvatni og loks skiljuvatni frá holu KG-24 var dælt í holuna með hléum frá byrjun árs 1992 til 8. febrúar 1996. Dýpi holunnar er mælt með lóðun. Myndist útfellingar neðarlega í henni eða verði þar hrun minnkar lóðað dýpi. Útfellingar og hrun geta lokað fyrir æðar neðarlega í holunni og því minnkað það magn sem holan tekur við í niðurdælingu. Talið er að breytingar á dýpi geti gefið hugmynd um breytingar á viðtökugetu og því ástæða til að fylgjast með þeim. Sögu dælingarinnar og áhrifum á dýpi holunnar eru gerð skil á mynd 8 (Ásgrímur Guðmundsson o.fl. 2001). Þar sést að lóðað dýpi hefur minnkað við dælingu fyrst á vatni úr lóni og síðan ferskvatns, en staðið í stað meðan dæling á skiljuvatni frá holu KG-24 fór fram. Því virðist sem útfellingar hafi myndast og minnkað mjög viðtökugetu holunnar meðan dælt var vatni úr lóni og ferskvatni. Þær lóðanir sem gerðar hafa verið síðan dæling á skiljuvatni frá skiljustöð hófust 2002 sýna lítils háttar aukningu í lóðuðu dýpi. Athugun á hugsanlegum áhrifum niðurdælingar 20 og 50 kg/s í holu KG-26 á jarðhitakerfið og aðrar holur leiddi í ljós að kæliáhrif ættu ekki að ná til núverandi vinnsluholna, að vinnsla háþrýstigufu ykist nánast ekkert við 20 kg/s niðurdælingu og lítið við 50 kg/s og að nettó aukning varmavinnslu yrði óveruleg (Ómar Sigurðsson 2001). Skiljuvatni frá skiljustöð hefur nú (apríl 2003) verið dælt í holuna frá því í janúar 2002 með hléum. Við dælinguna opnaðist holan að nýju og tekur hún nú við um 60 kg/s. Sennilega hafa útfellingar sem mynduðust við fyrri tilraunir leyst upp í þessu vatni auk þess sem dælingin hefur haft áhrif til opnunar sprungna. Verður niðurstaða tilraunarinnar fram að þessu að teljast mjög jákvæð, þó að æskilegt væri að gera ferilefnaprófun til að grennslast fyrir um afdrif niðurdælingarvatnsins. Mælt er með að naftalensúlfónöt verði notuð til þess, verði slík efni flutt til landsins vegna annarra viðameiri ferilprófana (Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson 2002) t.d. á Skaftárvæði.



Mynd 8. Breytingar á dýpi KG-26 með tíma og dæling í holuna eftir borun (Ásgrímur Guðmundsson o.fl. 2001).

6 AÐGERÐIR

Fyrstu vinnsluholur Kröfluvirkjunar reyndust flestar hávermisholur og fór svo um síðir að bora þurfti sérstakar lágvermisholur fyrir lágþrýstiprep virkjunarinnar. Því reyndist affallsvatn frá virkjuninni miklu minna en ráð hafði verið gert fyrir við hönnun. Þótti ekki ástæða til annarra aðgerða við förgun en að leiða affallsvatn í Hlíðardalslæk og láta það síga í Búrfellshraun. Fyrir Kröfluelda voru boraðar 10 holur í Bjarnarflagi og var vermi þeirra tiltölulega lágt og affallsvatn mikið og var því öllu veitt á hraunið. Vermi þeirra tveggja holna sem síðar voru boraðar var hærra og vatnsrennsli frá þeim minna. Metið hefur verið að frá upphafi aðgerða í Bjarnarflagi og fram til ársins 2002 hafi um 200 milljón tonnum af affallsvatni verið veitt út á Búrfellshraun frá Kröflu og á nálæg hraun frá Námafjalli og hefur þess ekki séð stað í breyttri efnasamsetningu Mývatns eða linda við vatnið. Verður það því að teljast mjög vel heppnuð aðgerð og er ekki ástæða til annars en að mæla með að henni verði haldið áfram, a.m.k. með hluta affalls frá þessum svæðum.

Tilraun um niðurdælingu í holu KG-26 hefur gefið mjög góða raun og fáist góðar niðurstöður úr ferilprófun vegna hennar er einnig full ástæða til að mæla með áframhaldandi niðurdælingu þar sem slík aðgerð mun lengja líftíma svæðisins auk þess

sem hún er umhverfisvæn leið til losunar affallsvatns. Vel getur komið til greina að kanna möguleika á því hvort fleiri holur, sem þegar hafa verið boraðar, megi nýta til niðurdælingar eða að bora nýjar holur í því augnmiði ef nauðsynlegt reynist í framtíðinni. Þó skal forðast niðurdælingu í Hvíthólasvæði nema tryggt sé að dælt sé niður fyrir jarðhitakerfið þar. Slík niðurdæling hefur yfirleitt gefið góða raun á hávermissvæðum og má þar nefna Geysissvæðið, Kaliforníu (Endeby o.fl. 1991), Larderellosvæðið á Ítalíu (t.d. Bertrami o.fl. 1985) og Matsukawasvæðið, Japan (Hanano o.fl. 1991). Á þessum svæðum hefur þrýstingi verið haldið uppi án þess að til hafi komið kæling svæðisins eðs útfellingar. Á Bulalovsvæðinu í Filippseyjum kom í ljós að niðurdæling minnkaði framleiðslu og var niðurdæling færð lengra í burt frá vinnslusvæði en áður og hlaust af því verulegur ávinningur (Sta. Maria o.fl. 1995). Líkanvinna er á háu stigi fyrir Kröfluvirkjun auk þess sem ekki er líklegt að hafin verði niðurdæling án undangenginnar ferlunarprófunar. Þegar slíkar niðurstöður liggja fyrir er ólíklegt að lagt verði í framkvæmd, sem ekki teldist hagkvæm, eða ylli slysum á borð við stórminnkaða vinnslu vegna kælingar.

Verði haldið áfram að leiða affallsvatn í Hlíðardalslæk og í svelginn við Bjarnarflaglón þarf að fylgjast vel með efnasamsetningu grunnvatns í Búrfellshrauni og hraunum í nágrenni Námafjalls. Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2002) leggja til að vöktun vegna affalls frá Kröflu fari fram með sýnatöku úr holum AB-02, LUD-03, LUD-04 og Vogaflóa, en vegna affalls frá Bjarnarflagi úr Grjótagjá og Langavogi (mynd 7). Um tíðni sýnatöku má segja að lágmark sé að safna sýnum einu sinni á ári en æskilegt væri að safna a.m.k. frá sumum stöðunum oftár og þá e.t.v. ekki greina nema hluta efnanna.

Í stuttu máli er lagt til að:

- Halda áfram að veita affallsvatni í Hlíðardalslæk, en vakta grunnvatn í Búrfellshrauni og hraunum í nágrenni Námafjalls með sýnatöku og greiningu sýna af völdum stöðum a.m.k. árlega.
- Gera ferilefnaprófun v/niðurdælingar í holu KG-26 og halda áfram niðurdælingu ef sú prófun gefur jákvæða niðurstöðu.

Verði farið eftir þessum tillögum þarf að vera til vöktunaráætlun vegna grunnvatns á svæðinu. Þegar hafa verið gerðar tillögur um vöktun á og eftirlit með jarðhitasvæðunum Bjarnarflagi og Kröflu, komi til nýrra virkjana, stækkana og/eða rannsóknaborana, í skýrslum um mat á umhverfisáhrifum (Hönnun hf. 2000, VGK og Orkustofnun 2001, 2002). Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson (2002) lögðu til að lítills háttar breytingar yrðu gerðar á því fyrirkomulagi sem lýst var í skýrslunum einkum er varðar eftirlit með snefilefnum í affallsvatni. Eftirfarandi áætlun tekur mið af tillögum í ofangreindum skýrslum.

Eftirlit með almennum áhrifum affallsvatns

- Fylgst verður með breytingum á gróðurfari við Hlíðardalslæk og tjarnir við vesturjaðar Búrfellshrauns.
- Fylgst verður með vatnsborði tjarna við vesturjaðar Búrfellshrauns og með grunnvatnshæði í borholum austan og sunnan Námafjalls tvisvar á ári.

- Grunnvatnslíkan af svæðinu verður endurskoðað með nýjum gögnum eftir því sem þörf er á.
- Eftirlit með efnasamsetningu
- Fylgst verður grannt með rennsli, vermi og efnasamsetningu borholuvökva fyrstu daga eftir upphleypingu nýrra eða endurboraðra borholna. Í 4-6 mánaða blástursprófun verða tekin sýni til efnagreininga mánaðarlega, a.m.k. í eitt þeirra skipta til snefilefnagreininga.
- Fylgst verður með efnainnihaldi vökva vinnsluholna a.m.k. einu sinni á ári, og snefilefnainnihaldi á þriggja ára fresti.
- Til eftirlits með affallsvatni verður sýnum til heildargreiningar safnað einu sinni á ári en sýnum til snefilefnagreiningar tvisvar á ári úr frárennsli skiljustöðva, Hlíðardalslæk, holum AB-02, LUD-03 og LUD-04 í Búrfellshrauni, niðurfalli frá Bjarnarflagslóni, Grjótagjá og lindum í Langavogi og Vogaflóa við Mývatn (sjá mynd 7). Í töflu 10 er gerð grein fyrir kostnaði við tvo kosti á eftirliti vegna grunnvatns á Námafjalls- og Kröflusvæðum. Gert er ráð fyrir að Orkustofnun sjái um heildarssöfnun en starfsmaður virkjunarinnar um hlutsöfnun. Mælt er með kosti II.

Tafla 10. Tveir möguleikar á tilhögun eftirlits með grunnvatni í Mývatnssveit vegna affallsvatns frá Kröflu og Námafjalli.

Tilhögun	Árlegur fjöldi sýna af hverjum söfnunarstað	Fjöldi söfnunarstaða að sumri	Fjöldi söfnunarstaða að vetri	Greining á sumar – sýni	Greining á vetrarsýni	Kostnaður í kr. án vsk.
I	2	6	3	Heildargreining	Hlutgreining (Analytica)	1.250.000
II	1	6	0	Heildargreining		1.150.000

7. HEIMILDIR

- Ásgrímur Guðmundsson 2001. *Förgun á affallsvatni Kröfluvirkjunar*. Orkustofnun, greinargerð ÁsG-01/02, 5s.
- Ásgrímur Guðmundsson og Trausti Hauksson 1998. *Krafla – Förgun skiljuvatns frá Hvíthólasvæði með niðurdælingu í holu KJ-22*. Orkustofnun, greinargerð ÁsG-TH-98/03, 5 s.
- Ásgrímur Guðmundsson, Ómar Sigurðsson og Benedikt Steingrímsson 2001. *Krafla – Niðurdæling í KG-26*. Orkustofnun, greinargerð ÁsG-Ómar-BS-01/04, 13 s.
- Benedikt Steingrímsson og Halldór Ármannsson 1984. *Krafla - Um niðurdælingu affallsvatns á Hvíthólasvæði*. Orkustofnun, OS-84026/JHD 08B, 14 s.
- Bertrami, Calore, C., Cappetti, G., Celati, R. and D'Amore, F. 1985. A three year recharge test by reinjection in the central area of Larderello field: Analysis of production data. *Trans. Geother. Resour. Counc.*, 9, 293-298.
- Björn Þór Guðmundsson and Stefán Arnórsson 2002. Geochemical monitoring of the Krafla and Námafjall geothermal areas, N-Iceland. *Geothermics*, 31, 195-243.
- Björn Jóhannesson 1977. Um grunnvatnsstrauma á landræmu frá Dyngjufjöllum og norður í Öxarffjörð. *Tímarit Verkfræðingafélags Íslands*, 62, 33-38.
- Björn Jóhannesson 1980. Um grunnvatn á vatnasvæði Mývatns. *Tímarit Verkfræðingafélags Íslands*, 65, 74-77.
- Bragi Árnason 1976. *Groundwater systems in Iceland traced by deuterium*. Vísindafélag Íslendinga, 42, 236 s.
- Darling, W.G. and Ármannsson, H. 1989. Stable isotopic aspects of fluid flow in the Krafla, Námafjall and Theistareykir geothermal systems of northeast Iceland. *Chem. Geol.*, 76, 197-213.
- Einar Tjörvi Eliasson, Halldór Ármannsson, Kristján Sæmundsson, Knútur Árnason og Benedikt Steingrímsson 1998. *Greinargerð. Förgun heits affallsvatns frá Kröfluvirkjun*. Orkustofnun, greinargerð ETE/HÁ/KS/KÁ/BS/Krafla/002-1998, 5 s.
- Eneedy, S., Eneedy, K. and Maney, J. 1991. Reservoir response to injection in the Southeast Geysers. *Proc. 16th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, CA, 75-82.
- Eric de Zeeuw og Gestur Gíslason 1988. *The Effect of Volcanic Activity on the Groundwater System in the Námafjall Geothermal Area, NE Iceland*. Orkustofnun, OS-88042/JHD-07, 39 s.
- Freyr Þórarinnsson og Bára Björgvinsdóttir 1980. *Krafla – Námafjall. Grunnvatnshæð*. Orkustofnun, greinargerð FÞ-BB-80/01, 3 s.
- Friedman, I., Sigurgeirsson, Th. and Garðarsson, Ö. 1963. Deuterium in Iceland waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 27, 553-561.

- Guttormur Sigbjarnarson, Haukur Tómasson, Jónas Eliasson og Stefán Arnórsson 1974. *Álitsgerð um mengunarhættu vegna affallsvatns frá gufuvirkjun við Kröflu eða Hverarönd*. Orkustofnun, OS JHD 7427, OS ROD 7421, 16 s.
- Halldór Ármannsson 1988. *Um niðurdælingu í holu KJ-22 í Kröflu*. Orkustofnun, OS-HÁ-88/05, 2 s.
- Halldór Ármannsson og Kristján Sæmundsson 2003. *Svör við ábendingum varðandi baðstað í Jarðbaðshólum*. Orkustofnun, greinargerð HÁ-KS-03/04, 3 s.
- Halldór Ármannsson og Magnús Ólafsson 2002. *Efnarannsóknir á vatni úr holum, lindum og gjám í Búrfellshrauni og nágrenni*. Orkustofnun, OS-2002/076, 35 s.
- Halldór Ármannsson, Hrefna Kristmannsdóttir og Magnús Ólafsson 1998. *Krafla – Námafjall. Áhrif eldvirkni á grunnvatn*. Orkustofnun, OS-98066, 33 s.
- Hanano, M., Ohmiya, T. and Sato, K. 1991. Reinjection experiment at the Matsukawa vapour-dominated geothermal field: increase in steam production and secondary heat recovery from the reservoir. *Geothermics*, 20, 279-289
- Helga Tulinius og Ómar Sigurðsson 1991. *Krafla – Þrívið hermun fyrir vinnslusvæði í Hvíthólum*. Orkustofnun, OS-91046/JHD-07, 37 s.
- Helgi Hallgrímsson 1975. Greinargerð varðandi meðferð affallsvatns frá Kröfluvirkjun. *Blöð með athugasemdum send Náttúruverndarráði*, 3-6.
- Hrefna Kristmannsdóttir, Steinunn Hauksdóttir, Guðni Axelsson, Magnús Ólafsson og Halldór Ármannsson 1999. *Ferilprófun á Mývatnssvæðinu*. Orkustofnun OS-99028, 48 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, 57 s.
- Hönnun hf. 2000. *40 MW_e Jarðvarmavirkjun í Bjarnarflagi og 132 kV háspennulína að Kröflustöð. Frummat á umhverfisáhrifum*. Landsvirkjun, 121 s.
- Ingunn María Þorbergsdóttir 2002. *Exchange of solutes across the sediment-water interface in the shallow eutrophic Lake Mývatn, Iceland*. M.Sc. thesis, Department of Geology, University of Iceland, Science Division, 314 s.
- Jarðboranir ríkisins 1951. *Efnagreiningar á hverum og laugum*. 88 s.
- Jón Ingimarsson, Jónas Eliasson og Sven Þ. Sigurðsson 1976. *Frárennsli Kröfluvirkjunar*. Orkustofnun, OSSFS-7602, 30 s.
- Jón Ólafsson 1978. Kvikasilfur og arsen í borholum við Kröflu og Námafjall. *Náttúrufræðingurinn*, 48, 52-57.
- Jón Ólafsson 1979. The chemistry of Lake Mývatn and River Laxá. *Oikos*, 32, 82-112.
- Jón Ólafsson 1992. Chemical characteristics and trace elements of Thingvallavatn. *Oikos*, 64, 151-161.
- Kristján Sæmundsson 1969. *Boranir við Námafjall*. Orkustofnun – Jarðhitadeild, 55 s.

Kristján Sæmundsson, Stefán Arnórsson, Karl Ragnars, Hrefna Kristmannsdóttir og Gestur Gíslason 1975. *Krafla. Skýrsla um niðurstöður rannsóknarborana 1974*. Orkustofnun, OS JHD7506, 47 s.

Ómar Sigurðsson 2001. *Áhrif niðurdælingar í holu KG-26, Kröflu. Spá reiknilíkans um breytingar*. Orkustofnun, greinargerð Ómar-2001/05, 8 s.

Sta. Maria, R.B., Villadolid Abrigo, Ma.F., Sussman, D. and Mogen, P.G. 1995. Development strategy for the Bulalo geothermal field, Philippines. *Proc. World Geothermal Congress 1995*, 1803-1805.

Stefán Arnórsson 1976. *Kísill og brennisteinsvetni í affallsvatni frá gufuborholum*. Orkustofnun, OS JHD 7601, 48 s.

Stefán Arnórsson 1998. *Tillögur um förgun affallsvatns frá Kröflustöð*. Raunvísindastofnun HÍ, RH 18-98, 14 s.

Stefán Arnórsson og Auður Andrésdóttir 1998. *Förgun affallsvatns frá Kröflustöð – Fræðilegt mat á aðstæðum útfellinga steinefna úr vatninu*. Raunvísindastofnun HÍ, RH 17-98, 47 s.

Stefán Arnórsson og Einar Gunnlaugsson 1976. *Vatnasvið Hliðardalslækjar og affallsvatn frá Kröfluvirkjun*. Orkustofnun, OS JHD 7602, 13 s.

Stjórnartíðindi B 1999. *Reglugerð nr. 76/1999 um varnir gegn mengun vatns*. Umhverfissráðuneytið, 2231-2253.

Trausti Hauksson 1981. *Hugsanlegar tilraunir með niðurdælingu í Kröflu*. Orkustofnun, greinargerð OS-TH-81/01, 4 s.

Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson 1989. *Niðurdælingartilraun í holu KJ-22 – Tillögur og kostnaðaráætlun*. Landsvirkjun, Kröflustöð, 8 s.

Unnsteinn Stefánsson 1970. Fáeinar athuganir á efnafræði Mývatns sumarið 1969. *Náttúrufræðingurinn*, 40, 3.

Verkfræðistofan Vatnaskil 1999. *Mývatn – Grunnvatnslíkan af vatnasviði Mývatns*. Verkfræðistofan Vatnaskil, 82 s.

Verkfræðistofan Vatnaskil, Grímur Björnsson, Arnar Hjartarson, Peter E. Danielsen og Magnús Ólafsson 2003. *Svartsengi-Reykjanes. Vinnsluaeftirlit árið 2002. Hita- og þrýstímælingar 1995-2002. Efnavöktun 1996-2002*. Orkustofnun, OS-2003/005, 145 s.

VGK og Orkustofnun 2001. *Stækkun Kröfluvirkjunar í Skútustaðahreppi, Suður-Þingeyjarsýslu um 40 MW. Mat á umhverfisáhrifum*. Landsvirkjun, 100 s.

VGK Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns og Orkustofnun 2002. *Rannsóknaboranir á vestursvæði við Kröflu í Skútustaðahreppi. Mat á umhverfisáhrifum*. Landsvirkjun, 148 s.

VST – Virkir hf. 1975. *Kröfluveita. Skýrsla um forhönnun aðveitu Kröfluvirkjunar*. Orkustofnun, 48 s.

Wetang'ula, G.N. 2002. Ecological risk assessment of Nesjavellir geothermal power plant wastewater disposal in Lake Thingvallavatn in SW Iceland. In Lúðvík S. Georgsson (Editor) *The United Nations University Geothermal Training Programme*

Reports 2001. Report 16, 375- Georgsson (Editor) The United Nations University Geothermal Training Programme Reports 2001.

Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson 1983. *Kísiliðjan við Mývatn. Grunnvatnsrannsóknir*. Orkustofnun, OS-83118/VOD-10, 41 s.