



**ORKUSTOFNUN**

**RANNSÓKNASVIÐ - Reykjavík, Akureyri**

# **JARÐVARMVIRKJUN Í BJARNARFLAGI**

## **Mat á umhverfisáhrifum**

### **Áhrif losunar gastegunda og affallsvatns**

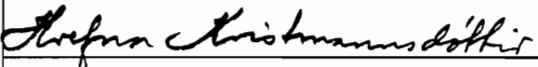
**Hrefna Kristmannsdóttir  
Halldór Ármannsson  
Steinunn Hauksdóttir**

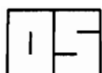
**Unnið fyrir Landsvirkjun**

**1999**

**OS-99105**



<b>Skýrsla nr:</b> OS-99105	<b>Dags:</b> Október 1999	<b>Dreifing:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Opín <input type="checkbox"/> Lokuð til
<b>Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill:</b> JARÐVARMVIRKJUN Í BJARNARFLAGI Mat á umhverfisáhrifum Áhrif losunar gastegunda og affallsvatns	<b>Upplag:</b> 30	
	<b>Fjöldi síðna:</b> 29	
<b>Höfundar:</b> Hrefna Kristmannsdóttir Halldór Ármannsson Steinunn Hauksdóttir	<b>Verkefnisstjóri:</b> Hrefna Kristmannsdóttir	
<b>Gerð skýrslu / Verkstig:</b> Mat á umhverfisáhrifum	<b>Verknúmer:</b> 8-760134	
<b>Unnið fyrir:</b> Landsvirkjun		
<b>Samvinnuaðilar:</b>		
<b>Útdráttur:</b> Skýrslan fjallar um möguleg umhverfisáhrif frá gasútblæstri og affallsvatni við rekstur 40 MW jarðvarmavirkjunar í Bjarnarflagi. Áhrif virkjunar þar á útstreymi gróðurhúsalofttegunda á Íslandi verða óveruleg. Talið er ónauðsynlegt að eyða brennisteinsvetni (H <sub>2</sub> S) úr gasútblæstri þrátt fyrir aukningu útblásturs í a.m.k. 5700 tonn árlega. Góð grunnþekking er til um styrk og dreifingu gassins á svæðinu og lagt er til eftirlit með mögulegri aukningu og afdrifum þess. Affallsvatn frá jarðhitasvæðinu er efnasnautt miðað við háhitavatn og uppfyllir að flestu leyti kröfur til drykkjarvatns. Styrkur áls, arsens og bórs er þó of hár. Í volga grunnvatninu á svæðinu er styrkur þessara efna nú 20-100 sinnum lægri en viðmiðunarstaðlar fyrir drykkjarvatn gera ráð fyrir. Affallsvatni frá virkuninni verður dælt aftur niður í jarðhitageyminn og verða heildaráhrif virkunarinnar á efnasamsetningu og hitastig grunnvatns því í lágmarki. Lífríki Mývatns er aðlagð því að kísilríkt volgt vatn blandist í það. Fylgjast þarf með að það jafnvægi raskist ekki vegna þverrandi náttúrulegs affalls frá svæðinu í kjölfar virkunarinnar. Lagt er til eftirlit með efnasamsetningu grunnvatns á grundvelli umfangsmikilla rannsókna OS og LV undanfarin þrjú ár.		
<b>Lykilorð:</b> Umhverfismat, gasútblástur, grunnvatn, mótvægisáðgerðir, Bjarnarflag, jarðvarmavirkjun	<b>ISBN-númer:</b> 9979-68-043-1	
	<b>Undirskrift verkefnisstjóra:</b> 	
	<b>Yfirfarið af:</b> HK	



**ORKUSTOFNUN**

Rannsóknasvið

Reykjavík - Akureyri

Verknr. 8-760134

**Hrefna Kristmannsdóttir**

**Halldór Ármannsson**

**Steinunn Hauksdóttir**

## **JARÐVARMVIRKJUN Í BJARNARFLAGI**

### **Mat á umhverfisáhrifum**

### **Áhrif losunar gastegunda og affallsvatns**

**Unnið fyrir Landsvirkjun**

**OS-99105**

**Desember 1999**

ISBN 9979-68-043-1

ORKUSTOFNUN - RANNSÓKNASVIÐ

Reykjavík: Grensásvegi 9, 108 Rvk. - Sími 569 6000 - Fax 568 8896

Akureyri: Glerárgötu 36, 600 Ak. - Sími 463 0957 - Fax 463 0998

Netfang: os@os.is - Veffang: <http://www.os.is>

## Efnisyfirlit

<b>1. Inngangur</b>	<b>3</b>
<b>2. Núverandi ástand</b>	<b>5</b>
i. Gasútblastur	5
ii. Affallsvatn	7
<b>3. Áhrif virkjunar</b>	<b>16</b>
i. Gasútblastur	16
ii. Affallsvatn	19
<b>4. Mótvægisáðgerðir</b>	<b>21</b>
i. Gasútblastur	21
ii. Affallsvatn	23
<b>5. Samanteknar niðurstöður</b>	<b>25</b>
<b>6. Heimildir</b>	<b>27</b>

## Töflur

Tafla 1.1. Einkenni H <sub>2</sub> S í andrúmslofti og leyfilegt hámark	4
Tafla 2.1. Niðurstöður efnagreininga á vatnssýnum úr grunnvatni og lindum	12
Tafla 2.2. Styrkur nokkurra snefilefna í grunnvatni og leyfilegur styrkur í drykkjarvatni	13
Tafla 2.3. Bórþol nokkurra nytjaplantna	14
Tafla 3.1. Efnasamsetning gufu reiknuð við bar a	16
Tafla 3.2. Árlegt útstreymi koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis nú og við virkjun	17
Tafla 4.1. Helstu leiðir til hreinsunar H <sub>2</sub> S úr jarðhitagufu	22

## Myndir

Mynd 2.1. Námafjall-Bjarnarflag. Brennisteinsvetni í andrúmslofti 26. ágúst 1993	7
Mynd 2.2. Flokkun grunnvatns á Mývatni eftir uppruna	8
Mynd 2.3. δD á móti δ <sup>18</sup> D fyrir grunnvatn á Kröflu-Námafjallssvæði	11

## 1. Inngangur

Þessi skýrsla er unnin í samvinnu Orkustofnunar og Landsvirkjunar og er hluti af stærri úttekt þar sem ætlunin er að meta umhverfisáhrif 40 MW gufuaflsvirkjunar sem fyrirhugað er að reisa í Bjarnarflagi. Hér er fjallað sérstaklega um áhrif gufuútblasturs og losun affallsvatns. Um er að ræða endurskoðun á kafla í skýrslu sem kom út 1996 á vegum Verkfræðistofunnar Hönnunar. Forsendur frá þeirri skýrslu hafa nokkuð breyst og jafnframt hafa Orkustofnun og Landsvirkjun á umdanförnum þremur árum unnið í sameiningu að viðamikilli rannsókn á grunnvatni við Mývatn. Skýrslur Halldórs Ármannssonar o.fl. (1998) og Hrefnu Kristmannsdóttur o.fl. (1999), þar sem hluti af niðurstöðum þeirrar rannsóknar eru birtar, eru fylgiskjöl með þeirri skýrslu sem hér birtist.

Helstu gös í jarðhitagufu, sem talin eru umhverfisspillandi, eru koltvíoxíð ( $\text{CO}_2$ ), brennisteinsvetni ( $\text{H}_2\text{S}$ ) og metan ( $\text{CH}_4$ ). Af sporefnum, sem berast með gufu, hafa menn einkum áhyggjur af kvikasilfri (Hg), ammóníaki ( $\text{NH}_3$ ), radoni (Rn) og bóri (B).

Á íslenskum jarðhitasvæðum er styrkur metans yfirleitt lágur og radon, ammóníak og bór hafa ekki fundist í hættulegu magni. Sama má segja um kvikasilfur, en það safnast fyrir í jarðvegi og lífverum á jarðhitasvæðum og við þau og þarf því að fylgjast með styrk þess í gufunni. Vetni finnst í mismiklu magni í jarðhitagasi, en það er ekki eitruð og styrkur þess ekki háður neinum takmörkunum.

Koltvíoxíð og metan eru gróðurhúsagös, en eru ekki eitruð. Það er háð alþjóðasamningum hversu mikið má losa af þeim og því nauðsynlegt að fylgjast með því magni sem fer út í andrúmsloftið. Hins vegar er ekki nauðsynlegt að mæla styrk þeirra í andrúmslofti í nágrenni virkjunarsvæða eins og styrk eiturgasa. Hafa verður vara á því að koltvíoxíð er þyngra en andrúmsloft og getur safnast saman í lægðir þegar ekki hreyfir vind. Þannig er hugsanlegt að dýr og jafnvel fólk geti kafnað lendi það í „koltvíoxíðpollum“ nálægt gasútstreymi.

Brennisteinsvetni ( $\text{H}_2\text{S}$ ) er eitruð gastegund og við ákveðnar aðstæður getur hluti þess oxast yfir í brennisteinstvíoxíð ( $\text{SO}_2$ ), sem er eitruð og losun þess háð alþjóðasamþykktum. Brennisteinstvíoxíð getur valdið súru regni við uppsöfnun í andrúmslofti og leysingu í raka. Hér á landi eru mörkin fyrir hámark brennisteinsvetnis í andrúmslofti með tilliti til vinnuverndar 10.000 ppb miðað við 8 stunda vinnudag, en í töflu 1.1 kemur fram hvaða áhrif brennisteinn hefur á menn. Ekki er vitað hvort eða hversu mikill hluti brennisteinsvetnisins oxast yfir í brennisteinstvíoxíð, en það er mjög háð ytri aðstæðum eins og hita, birtu og rakastigi.

Samkvæmt stöðlum Alþjóða heilbrigðisstofnunarinnar eru viðmiðunarmörk fyrir  $\text{H}_2\text{S}$ , 10.000 ppb miðað við átta stunda vinnudag (sjá töflu 1.1). Mesti leyfilegi styrkur kvikasilfurs í andrúmslofti er  $15 \text{ ng/m}^3$  samkvæmt Alþjóða heilbrigðisstofnuninni. Styrkur þessara efna í andrúmslofti á Námafjallssvæðinu er verulega undir þessum mörkum. Mesti leyfilegi styrkur  $\text{SO}_2$  í andrúmslofti er samkvæmt viðmiðunarmörkum fyrir gróður  $50 \text{ µg/m}^3$  miðað við sólarhringsmeðaltöl, en  $30 \text{ µg/m}^3$  miðað við ársmeðaltöl.

**Tafla 1.1** Einkenni  $H_2S$  í andrúmslofti og leyfilegt hámark (WHO, 1984).

Styrkur $H_2S$	Einkenni
5-15 ppb	Þefmörk
> 100 ppb	Næmni manna fyrir $H_2S$ dofna
10.000 ppb	Leyfilegt hámark í andrúmslofti miðað við 8 klst. Vinnudag
> 100.000 ppb	Hættulegt, nota ber viðeigandi öryggisbúnað
> 300.000 ppb	Varanlegt heilsutjón og banvænt í verstu tilfellum

Auk gass og þéttanlegrar gufu berst oft vatnsúði út í loftið frá jarðhitasvæðum, einkum frá öflugum borholum þar sem skiljur ráða ekki við streymið. Gufa og úði frá borholum geta borið með sér óæskileg efni, eins og kísil, flúor og bór, og valdið spjöllum á jarðvegi og gróðri. Ennfremur geta orðið útfellingar og úðinn haft tærandi áhrif á málma og mattað gler. Einfaldar tæringarmælingar og athugun á úða voru gerðar í Námafjalli samhliða mælingum á brennisteinsgösum (Magnús Ólafsson o.fl., 1997).

Í jarðhitavatni geta verið ýmis efni, sem eru skaðleg gróðri og lífverum ef þau berast í yfirborðsvatn eða grunnvatn. Styrkur slíkra efna er reyndar yfirleitt fremur lágur á íslenskum jarðhitasvæðum miðað við mörg erlend svæði. Þótt styrkur eiturefna í affallsvatni frá jarðhitavirkjun sé ekki mikill getur það valdið skaða ef þau blandast grunnvatni í einhverju magni. Það getur bæði hitað grunnvatnið og komið af stað óheppilegum efnahvörfum. Meðal annars geta breytingar á sýrustigi bæði verið skaðlegar lífi og leitt til leysingar þungmálma. Af þessum sökum þarf að þekkja grunnvatnsstrauma á viðkomandi svæði og fylgjast með hvernig affallsvatn dreifist og blandast grunnvatnskerfinu sé það losað beint á yfirborði eða í grunnvatn.

Hægt er með ýmsu móti að lágmarka mengun af völdum losunar affallsvatns í yfirborðs- og grunnvatn. Ein leið er að safna vatninu í tjarnir, eins og í Svartsengi, en þá kólnar það meira áður en það blandast grunnvatni. Einnig má beita efnafræðilegum aðferðum til að fella út skaðleg efni, líkt og gert er við hreinsun skólps. Sú lausn sem að jafnaði er talin hafa minnst áhrif á umhverfið, þegar til langs tíma er litið, er að veita vatninu aftur niður í jarðhitageyminn.

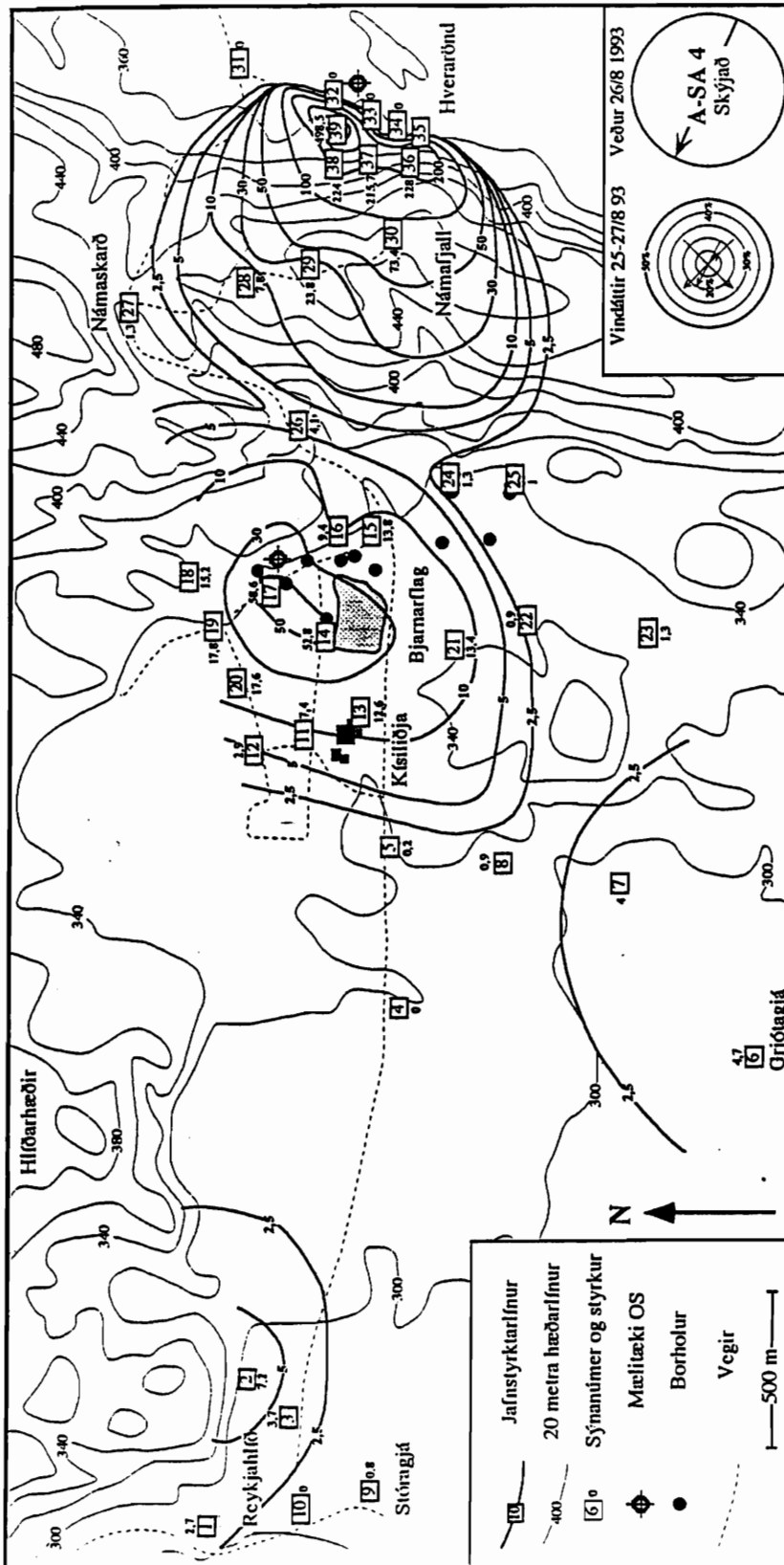
## 2. Núverandi ástand

### i. Gasútblastur

Áætlað er að tæplega 2000 tonn af koltvíoxíði ( $\text{CO}_2$ ) fari nú út í andrúmsloftið í Bjarnarflagi með náttúrulegu streymi frá gufuaugum og með borholugufu komi rúm 500 tonn til viðbótar á ári. Ústreymi brennisteinsvetnis ( $\text{H}_2\text{S}$ ) er um 1300 tonn árlega frá borholugufu og Kísiliðju og um 500 tonn frá gufuaugum. Vetni er oft um og yfir 50% af rúmmáli jarðhitagasa í útblæstri frá borholum í Námafjalli. Styrkur þess er ekki háður takmörkunum, en þetta er eldfimt gas og hafa til dæmis sést logandi þúfur á jarðhitasvæðinu í Bjarnarflagi. Þótt styrkur  $\text{CO}_2$  sé allnokkur er ústreymi þess á orkueiningu 5 til 10 sinnum minna en í olú- eða kolakjantum orkuverum (Ármannsson and Kristmannsdóttir, 1992). Af þessum sökum er jarðhitavinnsla talin umhverfisvæn raforkuframleiðsla.

Á undanförunum árum hafa farið fram talsverðar mælingar á kvikasilfri og brennisteinsgösum á virkjuðum og óvirkjuðum jarðhitasvæðum (Gretar Ívarsson o.fl., 1993, Magnús Á. Sigurgeirsson o.fl., 1995, Kristmannsdóttir et al., 1997, Kristmannsdóttir et al., 1999), í tengslum við átaksverkefni um Umhverfisáhrif jarðhitánýtingar (Hrefna Kristmannsdóttir, 1997). Á Námafjallssvæðinu voru árið 1993 gerðar punktmælingar á styrk brennisteinsvetnis og meðaltalsmæling gerð á styrk brennisteinsvetnis og brennisteinstvíoxíðs í einum punkti á miðju svæðinu í einn sólarhring. Sólarhringsmeðaltal fyrir brennisteinsvetni, mælt 25.-26. ágúst 1993, var  $83 \mu\text{g}/\text{m}^3$  eða 67 ppb (af massa). Á sama tíma gáfu punktmælingar hámarksgildið 522 ppb, en þar er um augnabliksgildi að ræða. Mælt sólarhringsmeðaltal á styrk brennisteinstvíoxíðs við gufuaflsstöðina í Bjarnarflagi 25-26. ágúst 1993 var um  $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Samtímis þessum mælingum var mæld dreifing brennisteinsvetnis á stóru svæði umhverfis Bjarnarflag. Á mynd 1 er sýnd dreifing  $\text{H}_2\text{S}$  á góðum sumardegum með hægum vindi og sýnir því væntanlega hámarksgildi.

Landsvirkjun lét gera mælingar á styrk brennisteinsgasa í Bjarnarflagi á tímabilinu 10. ágúst til 15. desember 1995 (Magnús Á. Sigurgeirsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1996). Niðurstöður þeirra benda til að styrkur brennisteinsgasa sé í hærra lagi á Námafjallssvæðinu miðað við hin virkjuðu svæðin. Mælistöðin var fyrst staðsett við gömlu rafstöðina í Bjarnarflagi þar sem langmestur útblástur er á öllu svæðinu og á þeim bletti þar sem gasmengun hlýtur að vera mest. Niðurstöður þeirra mælinga gáfu sólarhringsmeðaltöl fyrir  $\text{H}_2\text{S}$  á bilinu  $9\text{-}29 \mu\text{g}/\text{m}^3$  og  $6\text{-}48 \mu\text{g}/\text{m}^3$  fyrir  $\text{SO}_2$ . Þar sem styrkur  $\text{SO}_2$  þótti óeðlilega hár í þessum fyrstu niðurstöðum miðað við niðurstöður mælinga annars staðar, var ákveðið að flytja mælistöðina frá rafstöðinni. Mælistöðin þar var líka þannig staðsett að hugsanlegt var að útblástur frá rafstöðinni gæti lagst beint yfir mælitækin og gefið óeðlilega há gildi. Mælistöðin var því færð nær veginum, að núverandi skiljustöð. Mælingar þaðan sýna svipaðan styrk brennisteinsvetnis ( $\text{H}_2\text{S}$ ), á bilinu  $5\text{-}22 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , en styrkur brennisteinstvíoxíðs ( $\text{SO}_2$ ) er mun lægri, á bilinu  $0,5\text{-}11 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (Magnús Á. Sigurgeirsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1996). Meðaltal þessara mælinga er  $10,97 \mu\text{g}/\text{m}^3$  af  $\text{H}_2\text{S}$  og  $4,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$  af  $\text{SO}_2$  en meðaltal mælinga frá rafstöðinni er  $15,95 \mu\text{g}/\text{m}^3$  af  $\text{H}_2\text{S}$  og  $11,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$  af  $\text{SO}_2$ . Sólarhringsmeðaltölin eru þannig verulega hærri en hámarksgildi í punktmælingum eins og á mynd 2.1.



Mynd 2.1. Námajfall og Bjarnarflag. Brennisteinsvetni í andrúmslofti 26. ágúst 1993.



Þegar þessar niðurstöður eru skoðaðar vekur hinn háí styrkur brennisteinstvíoxíðs mesta athygli. Dæmi eru um háan styrk  $\text{SO}_2$  í andrúmslofti erlendra jarðhitasvæða, en þau svæði eru í öllum tilvikum þurrufusvæði. Tilgátur hafa verið uppi um að  $\text{H}_2\text{S}$  oxist yfir í  $\text{SO}_2$  og því séu háhitasvæðin uppspretta  $\text{SO}_2$  mengunar. Rannsóknir sem fram fóru á árunum 1992-1998 sýndu engin bein tengsl milli styrks  $\text{SO}_2$  og  $\text{H}_2\text{S}$  á íslenskum jarðhitasvæðum (Magnús Á. Sigurgeirsson o.fl., 1995, Kristmannsdóttir et al., 1997, Kristmannsdóttir et al., 1999). Eins og áður sagði er styrkur beggja gasanna mikill í andrúmslofti í Bjarnarflagi, en í andrúmslofti á Nesjavöllum er styrkur  $\text{SO}_2$  lítill, þótt þar sé styrkur  $\text{H}_2\text{S}$  mjög mikill (Gretar Ívarsson o.fl., 1993). Mælingar við gömlu skiljustöðina í Bjarnarflagi gefa einnig umtalsvert minni styrk  $\text{SO}_2$  en mælingar við rafstöð. Frá þessum mælingum þótti ljóst að rekja mætti styrk brennisteinstvíoxíðs í andrúmslofti við Námafjall til annarrar atvinnustarfsemi í Bjarnarflagi og leiddu mælingar á útblæstri Kísiliðjunnar (Egill Einarsson, pers. uppl.) síðar í ljós að hann var þaðan upprunninn.

Brennisteinsvetni fylgir hin svokallaða hveralykt og finnst hún greinilega í Bjarnarflagi og víðar í nágrenninu. Hún er skaðlaus í því magni sem nú er, en samkvæmt upplýsingum frá heimamönnum fellur brennisteinn á málma og hefur áhrif á endingu rafmagnstækja.

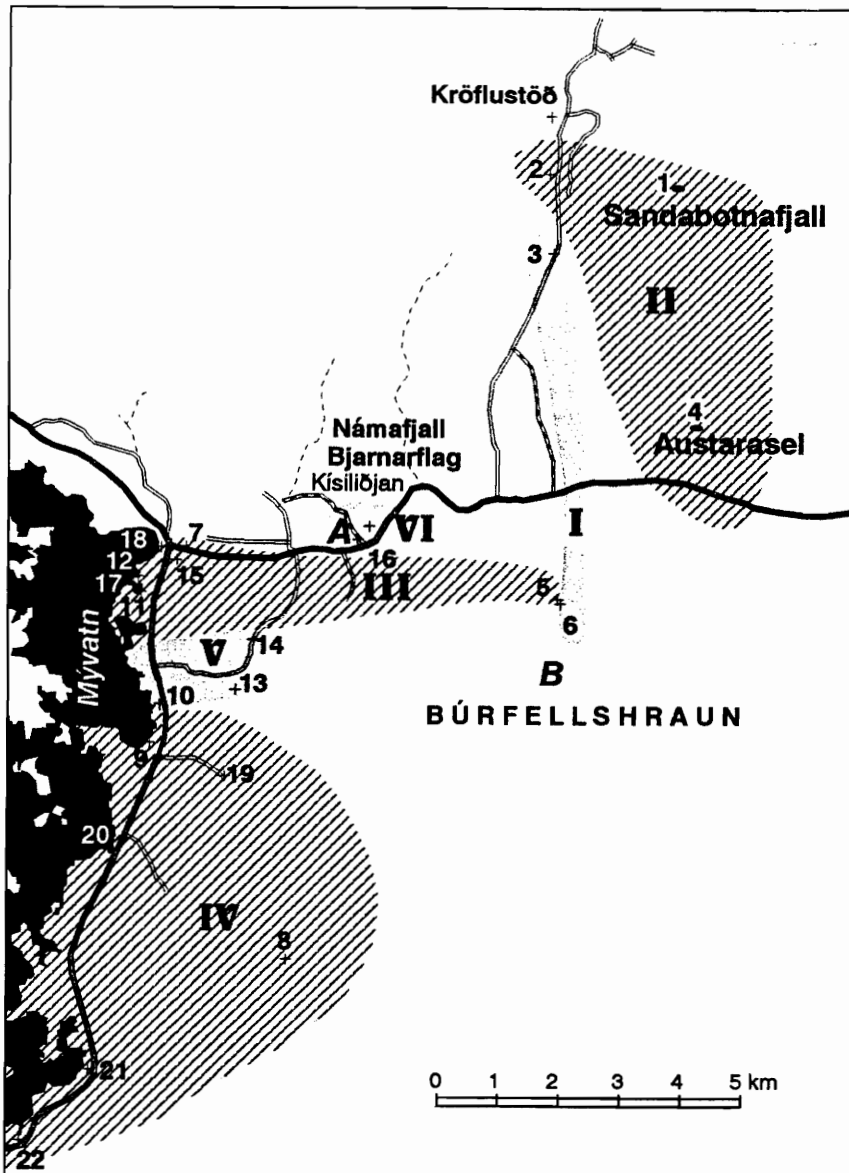
Styrkur kvikasilfurs í andrúmslofti á Námafjallssvæðinu hefur eins og á öðrum íslenskum jarðhitasvæðum mælst mjög lítill, um  $1,5 \text{ ng/m}^3$  eða minni (Gretar Ívarsson o.fl., 1993, Edner et al., 1991). Þetta er svipað gildi og mælist yfir úthöfunum á norðlægum slóðum. Ekki hefur verið rannsakað hversu mikið kvikasilfur safnast fyrir í jarðvegi á og við jarðhitasvæðin, en ekki er talin hætta á mikilli mengun þar sem heildarmagn þess kvikasilfurs, sem berst með gufunni, er ekki mikið, þótt styrkurinn sé um  $200 \text{ ng/l}$  í gufu (Jón Ólafsson, 1979). Við núverandi aðstæður berst um  $200 \text{ g}$  af kvikasilfri með gufunni upp á yfirborð á ári. Ljóst er frá mælingum á styrk kvikasilfurs í andrúmsloftinu að möguleg uppsöfnun yrði mjög staðbundin þar sem styrkur þess er mjög lágur í andrúmslofti á jarðhitasvæðinu í Námafjalli rétt við útblástursstað.

Reynslan hefur sýnt að járn og kopar geta tærst nokkuð mikið í nágrenni við jarðgufuvirkjanir. Einfaldar prófanir á úða og tæringu í nágrenni gufuorkuveranna í Kröflu, Nesjavöllum, Svartsengi og Bjarnarflagi sýna að næst útblæstri veranna er allnokkur tæring á járn og kopar en þessi tæring minnkar greinilega þegar fjær dregur. Ál tærðist hins vegar mun minna eins og búast mátti við (Magnús Á. Sigurgeirsson og Sverrir Þórhallsson, 1996, Magnús Ólafsson og Magnús Á. Sigurgeirsson, 1997). Þar sem þessar prófanir voru mjög einfaldar í sniðum ber einungis að líta á niðurstöðurnar sem vísbendingu um hvers kyns efni henti og henti ekki í mannvirki jarðvarmavirkjana. Ofangreindar prófanir gáfu vísbendingu um að tæringin minnki hratt þegar fjær dregur en ekki eru til haldbær gögn um hversu hratt dregur úr tæringu né heldur til að bera saman tæringu í nánd við jarðhitasvæði við tæringu annars staðar.

## ii. Affallsvatn

Frá því að fyrst var borað í Bjarnarflagi hefur affallsvatn verið losað á yfirborði. Vatnið hefur safnast fyrir í lón, norðan Hringvegarins og austan við Kísiliðju og lekið úr því ofan í hraunið (mynd 2.2). Lónið hefur stækkað nokkuð með tímanum vegna kísilútfellinga. Á þessu tímabili hefur ekki orðið vart óæskilegra áhrifa á umhverfið, en sumum finnst lónið lýti á landi og stinga í stúf við umhverfið (Orkustofnun og Verkfræðistofa Guðmundar og

Kristjáns, 1994). Hins vegar hefur verið lón í Bjarnarflagi í rúm þrjátíu ár og þær raddir hafa einnig heyrst að það gætu talist umhverfisspjöll að láta það hverfa alveg.



Mynd 2.2. Flokkun grunnvatns á Mývatni eftir uppruna.

Grunnvatnsstraumar voru rannsakaðir 1979-1983 í tengslum við hugsanlega mengun Mývatns frá affalli Kísiliðjunnar og afrennsli frá Kröfluvirkjun (Freyr Þórarinsson og Bára Björgvinsdóttir, 1980, Freyr Þórarinsson, 1980, Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson, 1983). Niðurstöður þeirra voru að grunnvatnsrennsli frá Bjarnarflagi væri til suðvesturs og vesturs og að annar grunnvatnsstraumur kæmi frá Jarðbaðshólum um Grjótagjá til vesturs að Vogaflóa. Talið var frá þessum athugunum að grunnvatn væri innan við tvær vikur að renna frá Bjarnarflagi til Mývatns.

Auk þess að líta á hugsanlega mengun frá jarðhitaorkuveri þarf að líta til annarra mögulegra breytinga á grunnvatnskerfinu. Lífríki Mývatns er aðlagð að því að volgt kísilríkt vatn blandist grunnvatnsstraumum sem í það renna. Verði virkjun rekin með þeim hætti að öllu affallsvatni verði dælt aftur niður gæti náttúrulegt affall raskast og kísilstyrkur t.d. lækkað í Mývatni. Þannig kann að reynast nauðsynlegt a.m.k. þegar fram líða stundir, að viðhalda affallslóni eða að dæla hluta affallsins grynna út í kalda/volga grunnvatnskerfið, en ekki niður í aðstremmisæðar jarðhitakerfisins.

Þekktar eru þær breytingar á grunnvatnskerfi á Námafjallssvæðinu, sem urðu vegna kvikuhlaupa frá Kröflueldstöðinni til suðurs (de Zeeuw and Gíslason, 1988, Ólafsson and Kristmannsdóttir, 1989). Þá kólnaði hluti jarðhitakerfisins vegna niðurrennsli, en einnig hitnaði efri hluti grunnvatnskerfisins og efnasamsetning þess breyttist verulega í kjölfarið eins og sjá má af samanburði sýna í töflu 1 úr Grjótagjá og neysluholu Kísiliðju frá mismunandi tímum. Áhrif eldsumbrotanna eru vel merkjanleg. Hitastigið í Grjótagjá var u.þ.b. 40°C fyrir umbrot en hæst mældist það 59°C árið 1978. Kólnunin hefur verið nokkuð hæg eins og sjá má á sýni frá 1992, þar sem það er 49°C en í september 1999 mældist það 46,6°C (Orkustofnun, gagnagrunnur JEF). Sama má segja um neysluholu Kísiliðjunnar þar sem hitabreytingarnar voru svipaðar í umbrotunum (sbr. sýni frá 1973 og 1978). Kalt grunnvatnsstreymi úr norðri nær að hafa meiri áhrif á hitastig neysluholunnar en hitastig í Grjótagjá og skýrir það nokkuð jafnan hitamun á þessum holum. Athuganir á bæði samsætum og á hitastigi í lindum og gjám í Mývatnssveit benda til þess að árstíðabundnar sveiflur geti verið í uppruna grunnvatnsins (Friedman o.fl., 1963, Bragi Árnason, 1976). Til þess að ganga nánar úr skugga um þetta hafa verið reknir síritandi hitamælar í Stórugjá og Grjótagjá s.l. þrjú ár og sveiflast hitastig í Grjótagjá um 1°C á þessu tímabili en um 0,7°C í Stórugjá. Í báðum tilvikum er hiti lægstur í apríl, en hann er hæstur í ágúst í Stórugjá en í nóvember í Grjótagjá. Ef um er að ræða kælingu af völdum leysinga á vorin en hitnun vegna lítils rennsli að hausti eru þau áhrif verulega tafir.

Affallsvatn sem losað er á yfirborði í Bjarnarflagi mun eiga greiða leið út í grunnvatnskerfið og út í Mývatn. Einnig er ljóst að afrennsli frá jarðhitakerfinu hefur um langan tíma farið út í Mývatn og lífríkið lagað sig að því.

Á árunum 1997–1999 hefur verið unnið að samvinnuverkefni milli Orkustofnunar og Landsvirkjunar um jarðefnafræðilegar rannsóknir á grunnvatni á Kröflu- og Námafjallssvæðum og voru fyrstu niðurstöður birtar í skýrslu 1998 (Halldór Ármannsson o.fl., 1998). Í jarðhitavatni í Bjarnarflagi hefur verið mældur styrkur flestra þeirra efna, sem talin eru óheppileg eða eru beinlínis eitruð og hafa flest slík efni verið mæld í grunnvatni á svæðinu (Halldór Ármannsson o.fl. 1998, viðauki I). Tilgangur samvinnuverkefnisins var að rannsaka uppruna grunnvatns á svæðinu, blöndun og rennislisleiðir mismunandi grunnvatnsstrauma, svo og afdrif affallsvatns frá áformuðum virkjunum. Í tengslum við þetta samvinnuverkefni voru gerðar fjórar ferilprófanir á svæðinu til að kanna frekar rennislisleiðir og þynningu affallsvatns frá Bjarnarflagslóni og niðurfalli affallslæks frá Kröflu (Hrefna Kristmannsdóttir o.fl., 1999, viðauki II). Gerð hefur verið frumkönnun á því hvort unnt er að rekja breytingu grunnvatns í háhitavatn með því að athuga líkleg efnahvörf milli vatns og bergs ásamt hugsanlegri blöndun við kvikugas, en vinnu við þann þátt er ekki lokið.

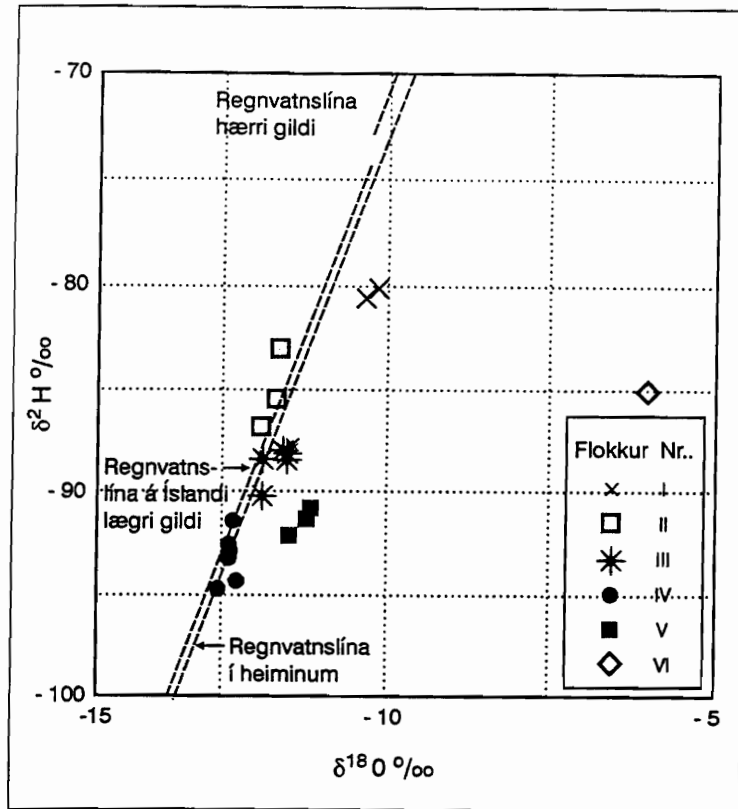
Helstu niðurstöður fyrrnefnds samvinnuverkefnis voru þær að flokka má grunnvatn á Kröflu-Námafjallssvæði í 6 flokka eftir uppruna (mynd 2.2 og 2.3) og eru þá vatn í affallslóninu í Bjarnarflagi (Flokkur VI) og í Hlíðardalslæk, sem í er affallsvatn frá Kröflu

(Flokkur I), sérstakir flokkar. Hinir flokkarnir staðfesta þá mynd að grunnvatn sunnantil á Mývatnssvæðinu er komið langt sunnan að (Flokkar IV og V) en norðan til á svæðinu er grunnvatnið upprunið úr hálendi norðan Námafjalls og frá Kröflu (Flokkar II og III). Engin merki hafa sést um affallsvatn frá Kröflu í grunnvatni eftir að Hlíðardalslækur hverfur í Búrfellshraun og eru merki um að það renni austan Mývatns áður en (og ef) það sameinast grunnvatnsstraumum sem það er talinn vera frá suðri til norðurs. Greinileg merki eru um að vatn frá affallslóninu í Bjarnarflagi berist hratt til Mývatns. Í flokki V sjást merki um efnaskipti vatns og bergs sem líklega má rekja til blöndunar við jarðhitavatn.

Heildarstyrkur efna í affallsvatni frá jarðhitamannvirkjum og náttúrulegt affallsvatn frá jarðhitasvæðum er eðlilega mun hærri en í köldu grunnvatni, enda er styrkur þessara efna í jarðhitavökvanum háður steindajafnvægi við ríkjandi hitastig í jarðhitageymunum. Áhrifa heits affalls með allháum styrk uppleystra efna frá jarðhitasvæðinu í Bjarnarflagi og e.t.v. einnig Kröflu gætir talsvert í grunnvatni austan við Mývatn. Í töflu 2.1 er sýndur styrkur helstu uppleystra efna í affallslóninu í Bjarnarflagi og til samanburðar í vatni úr Austaraselslindum og úr Grjótagjá, í baðgjá karla auk þess sem viðmiðunarmörk efna í drykkjarvatni eru gefin. Hér sést að affallsvatnið er undir þeim viðmiðunarmörkum í nær öllum atriðum, einungis heildarstyrkur uppleystra efna fer yfir mörkin.

Greinilegur munur er á grunnvatninu í Bjarnarflagi (Grjótagjá og neysluholu Kísiliðju) og neysluvatni úr Austaraselslindum, sem eru u.þ.b. 7 km austan við Námafjall, norðarlega í Búrfellshrauni. Er það eðlilegt, þar sem annars vegar er um að ræða grunnvatn sem er hitað upp af afrennsli háhitasvæðisins og ber greinilega einkenni háhitavatns en hins vegar grunnvatn, sem hingað til hefur ekki blandast jarðhitaaffalli. Til dæmis er styrkur kísils,  $\text{SiO}_2$ , og sulfats,  $\text{SO}_4$ , mikill miðað við hitastig í neysluholu Kísiliðjunnar í samanburði við ískalt og tært vatn úr Búrfellshrauni. Eins og fram kemur í töflunni er heildarefnastyrkur tífalt hærri í affallslóninu en í Austaraselslindum og rúmlega tvöfalt hærri en í Grjótagjá. Lítil styrkur brennisteinsvetnis er í volga grunnvatninu enda er affallsvatnið í lóni núverandi virkjunar að mestu laust við brennisteinsvetni þegar það sígur niður í berggrunninn. Einhver hluti þess oxast yfir í sulfat, og hluti þess gufar upp. Mikið magn sulfats í volga grunnvatninu gæti verið vísbending um streymi háhitavatns neðanjarðar út í kalda grunnvatnið samfara oxun brennisteinsvetnis í sulfat.

Styrkur ófjölliðaðs kísils í affallslóninu er 150-300 mg/l, en heildarstyrkur um 500 mg/l. Í skiljuvatni frá borholum er styrkur kísils hins vegar um 700 mg/l (Halldór Ármannsson, 1993). Þetta þýðir það að um 200 mg/l ná að falla út í lóninu, en um 200-350 mg/l fara út í grunnvatnskerfið á formi fjölliðaðs kísils. Talið er líklegt að sá hluti sem er fjölliðaður falli fljótlega út úr vatninu á leið þess um berggrunn og aðeins sá hluti sem ekki er fjölliðaður haldist í lausn og berist á endanum út í Mývatn. Í því affallsvatni sem rennur náttúrulega frá jarðhitasvæðinu er kísilstyrkur væntanlega hærri en í lónvatninu. Í Grjótagjá er styrkur kísils rúmlega helmingur þess sem oftast mælist af ófjölliðuðum kísli í affallslóninu eða um 155 mg/l. Til samanburðar er kísilstyrkur í Austaraselslindum 26 mg/l, sem reyndar er í hærri kantinum miðað við kalt grunnvatn. Þetta getur þó ekki talist óeðlilega hár styrkur og ekkert annað í efnafræði vatnsins bendir til jarðhitamengunar.



Mynd 2.3.  $\delta D$  á móti  $\delta^{18}O$  fyrir grunnvatn á Kröflu-Námafjallssvæði.

Niðurstöður um styrk ýmissa snefilefna, einkum þeirra er talist geta mengandi fyrir grunnvatn, eru meðal nýrra upplýsinga sem aflað var í fyrrnefndu samvinnuverkefni Orkustofnunar og Landsvirkjunar (Halldór Ármannsson o.fl., 1998). Niðurstöður nokkurra slíkra mælinga í köldu og volgu grunnvatni, lind á bakka Mývatns, og í affallslóni Kísiliðjunnar í Bjarnarlagi eru í töflu 2.2. bornar saman við leyfilegan styrk sömu efna í drykkjarvatni skv. stöðlum WHO (1984) og viðmiðunarstöðlum í reglugerð Evrópubandalagsins (1998). Eins og fram kemur í töflunni eru þau einu þessara efna sem eru yfir viðmiðunarmörkum fyrir drykkjarvatn, ál (Al) og arsen (As). Styrkur bórs (B) er einnig hár og yfir viðmiðunarmörkum fyrir sumar plöntur sbr hér á eftir og reyndar yfir viðmiðunarmörkum skv. tilskipun Evrópusambandsins frá 1998. Kvikasilfur (Hg) var ekki mælt í lóninu en þekkt er að Hg styrkur í vatni frá holum í Námafjalli er af stærðargráðunni 0,0001 mg/l eða tífalt lægra en viðmiðunarmörk þótt það sé í hærra lagi miðað við íslenskt jarðhitavatn. Kvikasilfur safnast að mestu í gufufasa og var fjallað um kvikasilfur í gufufasa í kaflanum hér að framan. Styrkur Cd var ekki mældur þar sem mæliaðferðir á rannsóknarstofu Orkustofnunar námu ekki styrk þess í affallsvatni. Eins og sýnd eru dæmi um í töflu 2.2 og fram kemur nánar í fyrrnefndri skýrslu um grunnvatnsathuganir á svæðinu 1997-1999 þá er styrkur allra helstu mengandi snefilefna í köldu og volgu grunnvatni og í lindarvatni á bökkum Mývatns langt neðan við leyfileg mörk og yfirleitt svo lítil að lífi í Mývatni ætti ekki að vera nein hættu búin af þeim sökum.

**Tafla 2.1 Niðurstöður efnagreininga á vatnssýnum úr grunnvatnskerfi Námafjalls og vatns úr Austaraselslindum (mg/l).**

Staður	Grjótagjá <sup>o</sup>	Grjótagjá <sup>o</sup>	Grjótagjá <sup>x</sup>	Neysluhola Kísiliðju <sup>o</sup>	Neysluhola Kísiliðju <sup>o</sup>	Neysluhola Kísiliðju <sup>o</sup>	Neysluhola Kísiliðju <sup>o</sup>	Austaraselslindir <sup>o</sup>	Austaraselslindir <sup>x</sup>	Affallslón Bjarnarflagi <sup>x</sup>	Viðmiðunar mörk <sup>o</sup>
Dagsetning	11.12.73	10.26.92	11.08.97	11.12.73	05.23.78	06.14.85	06.21.81	08.08.97	11.08.97	-	-
Númer	-	92-0236	97-0451	-	-	-	81-9016	97-0441	97-0453	-	-
Hiti (°C)	c.a. 40	49	48	c.a. 30	50	42	3,6	4,1	36	-	-
Sýrustig (pH/°C)	8,58/25	8,2/22	8,23/24	7,94/25	8,18/21	7,93/22	7,6/23	7,63/22	7,04/24	6,5-9,5	
Leiðni (µS/sm)	-	476	465	-	-	-	-	140	465	2500	
Kísill (SiO <sub>2</sub> )	112	165	156	70	168	115	26,4	27,2	281*	-	
Upplýst efni (TDS)	499	447	409	457	560	419	164	103	1094	1000	
Natríum (Na)	80,4	84,5	75,7	62,4	98,6	75,9	7,8	9,5	142	200	
Kalíum (K)	7,5	8,4	7,4	6,5	10,6	8,9	1,1	1,1	20,1	1000-200	
Kalstúm (Ca)	32,5	13,9	12,8	41,4	13,9	19,6	8,7	110,4	2,02	<200	
Magnesium (Mg)	5,9	3,4	2,9	5,7	1,82	3,5	5,0	5,9	0,29	50	
Karbonsat (CO <sub>2</sub> )	83	116	117	83	87	76	40,0	55,4	30,1	-	
Súlfat (SO <sub>4</sub> )	174	73,2	63,4	172	122	116	5,7	5,0	232	250	
Brennist. vetni (H <sub>2</sub> S)	0	0	0,06	<0,1	2,8	0	0,0	0	0,14	0,2 <sup>v</sup>	
Klóríð (Cl)	21,8	21,2	18,0	14,6	27,6	23,2	2,9	2,8	60,2	250	
Flúoríð (F)	-	0,45	0,42	0,4	0,54	0,39	0,058	0,12	0,719	1,5	
δD (‰ SMOW)	-	-	-90,9	-	-	-	-	-86,9	-85,2	-	
δ <sup>18</sup> O (‰ SMOW)	-	-	-11,58	-	-	-	-	-12,38	-5,97	-	

- Ekki mælt eða vanið upplýsingar

<sup>o</sup> Úr gagnagrunni Orkustofnunar

<sup>x</sup> Úr efnasamsetning neysluvatns á Íslandi, Orkustofnun greinargerð GSV-91/05

\* Ófjöllibaður kísill. Heildarstyrkur kísils er um 500 mg/l

<sup>o</sup> Evrópusambandið, 1998, <sup>v</sup> WHO, 1984

**Tafla 2.2.** Styrkur nokkurra snefilefna í vatni frá Námafjallssvæði og leyfilegur styrkur í drykkjarvatni (mg/l).

Staður	Austarasel	Helgagjá	Helluhr. 12, Reykjahlíð	Helgavogur	Bjarnarflag	Leyfilegur styrkur
<i>Gerð</i>	<i>Kalt grunnvatn</i>	<i>Kalt grunnvatn</i>	<i>Volgt grunnvatn</i>	<i>Lind á bakka Mývatns</i>	<i>Affallslón</i>	
B	0,04	0,02	0,22	0,11	2,96	(1,0) <sup>1)</sup>
Al	0,003	0,008	0,009	0,008	0,890	0,2 <sup>3)</sup>
Cr	0,0003	0,001	0,0005	0,0005	0,0004	0,05 <sup>3)</sup>
Mn	0,0008	0,0001	0,0002	0,0001	0,005	0,05 <sup>3)</sup>
Fe	0,0048	0,0038	0,0025	0,0018	0,032	0,2 <sup>3)</sup>
Cu	0,0012	0,001	0,0012	0,0008	0,0019	2,0 <sup>3)</sup>
Zn	0,0158	0,002	0,0012	<0,0001	0,004	5,0 <sup>4)</sup>
As	<0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,23	0,01 <sup>3)</sup>
Hg	e.á. <sup>2)</sup>	0,00001	0,00004	<0,000005	e.á. <sup>2)</sup>	0,001 <sup>3)</sup>
Pb	<0,0002	<0,0002	<0,0002	<0,0002	0,0002	0,01 <sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Viðmiðunarmörk fyrir plöntur. Sjá texta.

<sup>2)</sup> e.á.: ekki ákvarðað

<sup>3)</sup> Evrópusambandið 1998

<sup>4)</sup> WHO (1984)

Í vatni frá affallslóninu er það eingöngu styrkur Al og As sem fer fram úr leyfilegum mörkum fyrir drykkjarvatn en í grunnvatni á svæðinu er styrkur þessara efna 20-100 sinnum lægri en viðmiðunarmörkin. Ferilprófanir sem gerðar voru til að meta rennsli og rennslisleiðir grunnvatnsins við Mývatn benda til mikillar þynningar á leið affallsvatnsins til Mývatns (Hrefna Kristmannsdóttir, 1999). Þannig má ætla að styrkur efnanna minnkaði langt niður fyrir viðmiðunarmörk þó að magn affalls frá borholum fjórfaldaðist.

Í sambandi við not vatns til landbúnaðar má geta þess að helst er horft til heildarstyrks efna eða leiðni og mælt með að hún sé neðan við 750  $\mu\text{S}/\text{sm}$ . Liggur nærri að vatnið úr affallslóninu mætti nota á þann veg þar sem leiðni þess mældist rétt rúmlega 500  $\mu\text{S}/\text{sm}$ , og er því mjög lítil miðað við annað háhitavatn. Í sambandi við ræktun er það bór sem helst er talið geta valdið skaða. Nyttjaplöntum er skipt í 3 flokka eftir bórþoli og eru þolmörk “næmra” plantna talin liggja á bilinu 0,33-1,25 mg/l, hálfþolinna á bilinu 0,67 til 2,50 mg/l, en þolinna á bilinu 1,00 til 3,75. US Department of Agriculture (1954) hefur flokkað plöntur eftir þoli og er sú flokkun sýnd í töflu 2.3. Ekki er að sjá að margar þeirra plantna sem ræktaðar eru hér úti eða í gróðurhúsum

falli í flokk plantna sem næmar eru fyrir bóri, en kartöflur, tómatar, hreðkur, bygg og hafrar eru í flokki hálfpolinna plantna svo að vatn á við affallslónsvatnið þyrfti að varast við ræktun þeirra.

**Tafla 2.3.** Bórþol nokkurra nytjaplantna.

Polnar	Hálfpolnar	Næmar
Glóðarlyng ( <i>Tamarix aphylla</i> )	Sólblóm	Valhnotutré
Spergill	Kartafla	Ætipistill
Pálmatré ( <i>Phoenix canariensis</i> )	Baðmull	Hvítar garðbaunir
Döðlupálmi ( <i>Phoenix dactylifera</i> )	Tómatur	Amerískur álmur
Sykkurrófa	Sætar baunir	Plóma
Fóðurrófa	Hreðka	Pera
Garðrófa	Gulerta	Epli
Refasmári	Munkahetta	Vínber
Jómfrúllilja	Ólfa	Kadota-ffkja
Hestabaunir	Bygg	Döðluplóma
Laukur	Hveiti	Kirsuber
Næpa	Mafs	Ferskja
Hvítkál	Dúrri	Aprikósa
Salat	Hafrar	Brómber án þyrna
Gulrót	Drottningarfífill	Appelsína
	Grasker	Lárpera
	Bjöllupipar	Greipaldin
	Sæt kartafla	Sítróna
	Smjörbaunir	

Eins og fram kom í kaflanum hér á undan er styrkur gasa hár í jarðhitavökvanum í Bjarnarflagi eins og í öllum háhitavökva, þrátt fyrir að það teljist fremur snauð af uppleystum efnum miðað við háhitavatn. Gös sem leysast upp í vatni haga sér á margan hátt öðruvísi en í lofti. Brennisteinsvetni leysist mjög auðveldlega upp í vatni og hvarfast við það og uppleyst súrefni. Búast má við að í vatni sem inniheldur súrefni eyðist brennisteinsvetnið þannig á nokkrum dögum og myndi súlfat sem er meinlaust.

Til að meta frekar rennslisraða og rennslisleiðir voru gerðar ferilprófanir í grunnvatnskerfinu á árinu 1998, bæði með flúrljómandi efnum og kalíumjodíði (Hrefna Kristmannsdóttir o.fl., 1999). Endurheimtur flúrljómaandi efna reyndust mjög



litlar og stopular, væntanlega vegna aðsogs efnanna á uppsafnaðan kísilgúr. Kalíumjodíð kom fram en í litlu magni og sumsstaðar virðist sýnataka hafa verið of stopul til að toppurinn kæmi vel fram. Tiltæk gögn frá ferilprófunum á Mývatnssvæðinu 1998 eru þannig of takmörkuð til þess að leyfa nákvæma túlkun. Á það bæði við um mælingar á endurheimtu ferilefnanna og magnbundnar upplýsingar um grunnvatnsrennsli á svæðinu. Mjög ónákvæmar áætlanir benda til þess að um fjórðungur þess jodíðs, sem sett var niður í affallslónið í Bjarnarflagi hafi skilað sér út í Mývatn á u.þ.b. 1/2 mánuði, en það sýnir mikinn hraða grunnvatnsstreymis á svæðinu. Þá sýna niðurstöðurnar að ferilefnið dreifist mjög vel um grunnvatnskerfið allt. Sama mun væntanlega gilda um áhrif hugsanlegs affallsvatns í Bjarnarflagi.

Við túlkun niðurstaðna kom í ljós að æskilegt væri að láta mæla rennslishraða grunnvatns á svæðinu og jafnframt að gerð nákvæms reiknilíkans af grunnvatnskerfinu væri mjög æskileg. Í kjölfarið var ráðist í hvort tveggja. Grunnvatnslíkanið mun verða grundvöllur að eftirliti með svæðinu í framtíðinni og gögn frá vinnslurannsóknum á jarðhitasvæðunum, efnarannsóknum og grunnvatnsathugunum í framtíðinni jafnframt notuð til að gera líkanið nákvæmara og treysta stöðir þess.

Afrennsli frá jarðhitakerfunum í Bjarnarflagi og væntanlega Kröflu líka hefur um langan aldur farið út í grunnvatnskerfið og þaðan í Mývatn og er ein undirstaðan í sérstæðu lífríki þess. Samfara eldsumbrotum hafa einnig verið miklar sveiflur á því affalli, sem fer út í grunnvatnskerfið. Auk þess sem bent var á hér að framan um sveiflur í efnasamsetningu grunnvatnsins má nefna að hitastig í lindum við Ytriflóa var allt að 18 gráðum hærra í október 1978 en fyrir umbrotin í Kröflueldum (Jón Ólafsson, 1991). Ekki er vitað hversu miklar slíkar sveiflur eru í samanburði við sveiflur vegna núverandi vinnslu í Bjarnarflagi, en líklegt að þær séu mun stærri.

Efnasamsetning Mývatns er vel þekkt (Ólafsson, 1979). Einnig heldur Náttúru- rannsóknastöðin við Mývatn uppi reglubundnu eftirliti með styrk næringarefna í vatninu. Nákvæmar rannsóknir fóru fram á vistkerfi Mývatns samhliða vinnu sérfræðinganefndar um Mývatnsrannsóknir, sem kannaði áhrif námareksturs Kísiliðjunnar hf. á dýralíf og gróður í Mývatni.

### 3. Áhrif virkjunar

#### i. Gasútblastur

Samkvæmt áætlunum er gufuþörf 40 MW<sub>e</sub> virkjunar tæplega 89 kg/s. Gert er ráð fyrir að skiljuvatni verði skilað beint aftur niður í jarðhitageyminn. Til vara er þó gert ráð fyrir að byggður verði hljóðdeyfir sem notaður verður ef niðurrennslikerfi bilar. Í því tilfelli munu tæp 14 kg/s af gufu rjúka út í andrúmsloftið frá 40 MW<sub>e</sub> virkjun. Einnig er hugsanlegt að talið verði æskilegt að viðhalda affallslóni af lágmarksstærð eins og fjallað verður um síðar í skýrslunni.

Tafla 3.1 sýnir efnasamsetningu gufu, reiknaða við 1 bar<sub>a</sub> fyrir holur 11, 12 og 4 (Halldór Ármannsson, 1993). Gert er ráð fyrir að efnasamsetning frá nýjum holum verði svipuð því sem er í holum 11 og 12. Hafa ber í huga að á flestum jarðhitasvæðum er styrkur lofttegunda í gufu breytilegur með tíma og eftir borholum.

Ef miðað er við að 40 MW<sub>e</sub> virkjun verði rekin í 8100 klst á ári (reiknað er með að virkjunin verði stöðvuð vegna viðhalds í um mánaðartíma yfir sumartímann, annað hvort öll eða að hluta) og að styrkur brennisteinsvetnis (H<sub>2</sub>S) í gufu sé um 2000 mg/kg (0,2 % af gufu), má reikna með að árlegt útstreymi H<sub>2</sub>S verði um 5700 tonn. Í töflu 3.2 er áætlað heildarútstreymi koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis miðað við núverandi ástand og 40 MW<sub>e</sub> virkjun. Brennisteinsvetni er hvarfgjarnara en koltvíoxíð og því eykst náttúrulegt útstreymi þess hlutfallslega meira við vinnslu.

Erfitt er að meta hver heildargasútblastur virkjunar verður við virkjun. Sé gert ráð fyrir þrefaldri aukningu á H<sub>2</sub>S útblæstri yrði það væntanlega mesti H<sub>2</sub>S útblástur frá einu jarðhitasvæði á Íslandi. Þó er hann verulegur á Nesjavöllum, en þar hafa alloft verið gerðar mælingar á H<sub>2</sub>S í andrúmslofti auk þess sem tilraun hefur verið gerð til að reikna styrk þess og dreifingu með því að nota líkanið ISC3 (Noorollahi, 2000). Niðurstöður líkansins eru um stærðargráðu hærri en hæstu niðurstöður mælinga og stafar það væntanlega af því hversu brennisteinsvetni er hvarfgjarnant. Þó er það ekki nema í undantekningartilfellum sem H<sub>2</sub>S styrkur rétt nær þeim skaðsemismörkum, sem sett eru v/8 klst. vinnu og þá í þeim punktum sem því er sleppt út. Útblástur í Svartsengi er minni og fengust þar hámarksgildi sem voru af svipaðri stærðargráðu og mæld gildi, þó heldur hærri (0,4-1 ppm eftir hve jafnað var yfir langan tíma) (Kolliko, 1999). Þess má geta að almennt hafa mælst svipuð gildi H<sub>2</sub>S í andrúmslofti á jarðhitasvæðum á Íslandi, óháð útblæstri (Kristmannsdóttir, H. et al., 1999).

**Tafla 3.1.** Efnasamsetning gufu reiknuð við 1 bar<sub>a</sub> (mg/kg) (upplýsingar frá Halldóri Ármannssyni, 1993).

Hola nr	Sýni nr.	Dags.	CO <sub>2</sub> mg/kg	H <sub>2</sub> S mg/kg	H <sub>2</sub> mg/kg	O <sub>2</sub> mg/kg	CH <sub>4</sub> mg/kg	N <sub>2</sub> mg/kg	Heildar-gas %
B-11	5002	92/5/1	925	1663	100	8,5	13,6	68,4	0,28
B-12	5001	92/4/30	1747	1934	192	12,9	16,1	107	0,4
B-4	1036	85/6713	542	616	145	0,6	29,0	26,3	0,13

**Tafla 3.2.** Árlegt útstreymi koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis (tonn/ár) í Námafjalli nú og miðað við áætlaða virkjun. Áætluðum breytingum við virkjun verður að taka með fyrirvara því reikna má með að náttúrulegt útstreymi (gufuaugu) aukist þegar virkjað er (upplýsingar frá Halldóri Ármannssyni, 1993).

Núverandi ástand			
	Gufuaugu	Núv. 3 MW <sub>e</sub> virkjun og Kísiliðja	Samtals
CO <sub>2</sub>	2000	500	2500
H <sub>2</sub> S	500	1300	1800
Breyting við virkjun			
	Gufuaugu	40 MW <sub>e</sub> Virkjun	Samtals
CO <sub>2</sub>	2000	4000	6000
H <sub>2</sub> S	500	5200	5700

Áhyggjur manna af brennisteinsvetni beinast fyrst og fremst að lykt þess, sem er vel greinanleg langt niður fyrir öll hættumörk (sjá töflu 1.1). Því er það mjög háð yfirborðsvirkni hver viðbrögð íbúa á jarðhitasvæðum verða við virkjun jarðhita. Á svæðum þar sem lítil sem engin yfirborðsvirkni er fyrir en brennisteinsfnykur gýs upp við boranir, verða oft og tíðum hörð viðbrögð meðal nágretta (t.d. á Geysissvæðinu í Kaliforníu og Milos, Grikklandi). Þar sem mikil yfirborðsvirkni er fyrir eins og til dæmis í Námafjalli og lykt finnst við náttúrulegt útstreymi, verður ekki merkjanleg breyting á brennisteinsþef. Frumniðurstöður um styrk brennisteinsvetnis í andrúmslofti benda ekki til að hann sé verulega meiri á virkjuðum svæðum en óvirkjuðum, yfirborðsvirkum svæðum, né heldur að hann aukist við virkjun (Gretar Ívarsson o.fl., 1993).

Tilgátur hafa verið á lofti um að brennisteinsvetni í útblæstri frá jarðhitasvæðum geti oxast yfir í brennisteinstvíoxíð og aukið hættuna á súru regni og meðfylgjandi sýringu jarðvegs. Eins og fram kom hér að framan þá hafa verið gerðar athuganir á hugsanlegri oxun H<sub>2</sub>S í SO<sub>2</sub>. Niðurstöður sýna að H<sub>2</sub>S þvæst umsvifalaust úr andrúmslofti í rigningu og að brennisteinsvetni felli út brennistein í snertingu við loft og vatn, en hann er ekki eins skaðlegur fyrir jarðveg og brennisteinstvíoxíð (Halldór Ármannsson o.fl., 1991). Jafnvel á þurrum, lygnum dögum oxast aðeins lítið brot af H<sub>2</sub>S yfir í SO<sub>2</sub> (Kristmannsdóttir et al., 1999). Í nýlegri umfjöllun um slíka oxun er og komist að þeirri niðurstöðu að hún sé hægfara, margþrepa ferli (Brimblecombe, 1996). Því þarf ekki að búast við aukinni sýringu rigningar og jarðvegs í kjölfar virkjunar í Bjarnarflagi.

Tilraunir sem gerðar voru með hvörfun brennisteinsvetnis í tengslum við fyrrnefnt umhverfisverkefni (Kristmannsdóttir et al., 1999) sýndu að eftir fyrstu dagana var brennisteinsvetnið stöðugt um margra vikna skeið. Líklegt er talið að á meðan að

loftrakinn/gufan var að þéttast hafi brennisteinsvetnið leyst upp í vatnsdropunum, en síðan hafi nánast ekkert breyst. Tilraunin fór þannig fram að gufa var sett í loftþéttan plexiglerhólk og upphafsstyrkleikur brennisteinsvetnis hafður um 1000 mg/l. Hólkurinn var síðan geymdur í óupphituðum skúr þannig að hitastig sveiflaðist nánast með útihita en sólarljós komst ekki að honum. Þekkt er að við oxun brennisteinsvetnis virkar útfjólublátt ljós örvasandi svo og hækkað hitastig. Þannig má búast við að í röku, köldu og sólarlitlu loftslagi eins og á Íslandi oxist brennisteinsvetni mun hægar og í minna magni yfir í brennisteinstvíoxíð en í heitu, þurru og sólríku loftslagi. Við jarðhitasvæði á Ítalíu hefur mælst allhár styrkur brennisteinstvíoxíðs, sem talinn er stafa af oxun brennisteinsvetnis (Edner et al., 1991).

Þó að gert sé ráð fyrir að heildargasútblastur virkjunar þrefaldist frá núverandi útblæstri er engin hætt á að styrkur CO<sub>2</sub> í andrúmslofti verði það mikill að fari yfir skaðsemismörk (e.t.v. 500-1000 ppm í grennd við útblástur m.v. 10.000 ppm skaðsemismörk (NIOSH)). Magn þess er færi út í andrúmsloft á ári hverju er og mjög lítið í samanburði við heildarútblastur af manna völdum (u.þ.b. 0,2%) og lítil í samanburði við meðaltalsútblastur frá eldfjöllum. Á Nesjavöllum reiknaðist styrkur CO<sub>2</sub> alltaf undir 600 ppm þegar notað var líkanið ISC3 til að spá fyrir um dreifingu þess og er það í samræmi við mælingar á svæðinu (Noorollahi, 2000).

Eins og fram hefur komið er Ísland aðili að alþjóðlegum skuldbindingum varðandi losun gróðurhúsalofttegunda. Í samanburði á losun gróðurhúsalofttegunda mismunandi orkugjafa hérlendis, sem Umhverfissráðuneytið gerði fyrir árið 1990, kemur fram að jarðhitavirkjanir hafa í för með sér litla koltvíoxíðslosun (CO<sub>2</sub>), eða innan við 3 % af allri losun vegna orkunotkunar hérlendis (Umhverfissráðuneytið, 1992). Þrátt fyrir það sér jarðhiti landinu fyrir rúmlega 30 % af orkunni. Umhverfissráðuneytið áætlaði að heildarlosun koltvíoxíðs af manna völdum árið 1995 hafi verið 2277,4 þúsund tonn (Ministry for the Environment, 1995). Með aukningu í útblæstri koltvíoxíðs við 40 MW virkjun í Bjarnarflagi má því áætla að heildarútblastur koltvíoxíðs frá orkulindum hérlendis muni aukast um 0,18 %.

Heildarústreymi metans (CH<sub>4</sub>) frá jarðhitavirkjunum hefur ekki verið kannað. Umhverfissráðuneytið áætlaði að árið 1995 hafi heildarlosun metans af manna völdum verið 21,8 þúsund tonn. Samkvæmt útreikningum á efnasamsetningu gufu (tafla 7.3) í Bjarnarflagi má reikna með að heildarústreymi metans frá 40 MW<sub>e</sub> virkjun muni verða um 39 tonn á ári. Það samsvarar tæplega 0,18 % heildaraukningu losunar metans frá orkugjöfum hérlendis.

Af framangreindu er því ljóst að áhrif virkjunar í Bjarnarflagi á ústreymi gróðurhúsalofttegunda á Íslandi verða lítil. Aukin nýting jarðhita er einnig í samræmi við framkvæmdaáætlun ríkisstjórnarinnar vegna loftsslagsbreytingar þar sem lögð er áhersla á að stuðla að aukinni notkun jarðvarma og raforku úr vatnsafla í stað jarðefnaeldsneytis, á sem flestum sviðum.

Líklegt er að ústreymi gufu úr náttúrulegum gufuaugum aukist með aukinni nýtingu jarðhita. Ekki eru til gögn til að meta hversu mikil sú aukning verður. Í Svartsengi var til dæmis nánast engin yfirborðsvirkni áður en svæðið var virkjað, en hún hefur aukist ár frá ári og nú er mikið gufuústreymi í hrauninu við virkjunina. Engin magnmæling er til um gufu né gasústreymi tengt þessari virkni í Svartsengi. Í erlendum gufuvirkjunum er reynslan sú að náttúrulegt gufuústreymi eykst eftir virkjun, en ekki er kunnugt um beinar magnmælingar á slíkri aukningu. Aukning í

náttúrulegu útstreymi stafar af aukinni afgösun í kjölfar niðurdráttar á svæðunum og er því í beinum tengslum við niðurdrátt og lækkun suðuborðs. Þannig er ekki víst að í upphafi virkjunarinnar verði mikil aukning á náttúrulegri virkni, en við frekari nýtingu gæti hún orðið meiri.

Áhrif vatnsúða eru ekki að fullu þekkt og eru þau mismunandi milli svæða þar sem efnasamsetning gufunnar er breytileg milli svæða. Mestur verður vatnsúðinn frá gufuháfi við skiljustöð og frá hljóðdeyfum við holur í blæstri.

## ii. Affallsvatn

Gert er ráð fyrir að affallsvatni frá fyrirhugaðri 40 MW<sub>e</sub> jarðvarmavirkjun í Bjarnarflagi verði skilað aftur niður í jarðhitageyminn um 1500 m djúpa niðurrennslisholu. Rannsóknir á jarðvarmavökvanum í Bjarnarflagi, báðum megin Krummaskarðs, hafa leitt í ljós að vökvinn er tiltölulega efnasauður (uppleyst steinefni u.þ.b. 0,1 %) og hvorki tærandi né mengandi fyrir umhverfið (Halldór Ármannsson, 1993).

Borholuvökvinn verður skilinn við 9,4 bar<sub>a</sub> og hitastig skiljuvatns við þann þrýsting er 177°C. Útreikningar á kalsít- og ópalútfellingarhættu sýna að ekki þarf að óttast útfellingar við fyrirhugaðan skiljuþrýsting, þótt veitt verði niður við hann (Halldór Ármannsson, 1993).

Sé vökvi frá þessu skiljuþrepi nýttur í varmaskipti, eins og nú eru hugmyndir um, lækkar hiti hans, en styrkur kísils eykst vitaskuld ekki, því engin gufa tapast nú í afsuðu. Kísilmettunarhiti í slíkum skiljuvökva reiknast á bilinu 128°C til 138°C sé mið tekið af fjórum sýnum úr holu 11, en á bilinu 112°C til 145°C ef hliðsjón er höfð af fjórum sýnum úr holu 12. (Jón Örn Bjarnason pers. uppl.). Þegar hiti vökvans er orðinn lægri en sem þessu nemur getur kísill fallið út, en sé vökvinn kældur hratt talsvert niður fyrir þennan hita má tefja útfellingu.

Sýrustig (pH) vökvans sem um ræðir er fremur hátt, nálægt 8. Vegna þessa er kísilsýran í lausninni að nokkru klofin í jónir. Þetta lækkar í raun yfirmettunarstig kísilsins því einungis óklofin kísilsýra tekur þátt í útfellingahvarfinu. Af þessum sökum reiknast mettnarhiti kísilsins dálítið lægri en ef tekið væri mið af heildarkísilstyrk eingöngu.

Frá 40 MW<sub>e</sub> virkjun er áætlað að í kæliturni gufi að jafnaði um 40 kg/s af kælivatni. Þéttivatn er um 88 kg/s og með því að veita því í kælivatnshringrásina má bæta uppgufunina. Hugmyndin er að veita ofgnótt vatns, um 49 kg/s, á yfirborð og í grunnvatn um nærliggjandi sprungur. Þessi ofgnótt frá kæliturni er meinlaus, enda hefur vatnið verið afgasað. Við afgösun rjúka óæskilegar lofttegundir út og vatnið verður hlutlaust. Til samanburðar má geta þess að vatn frá kæliturni í Kröflu er ekki afloftað og því er pH gildi þess lágt og efnasamsetning önnur í samræmi við það. Einnig er tæknilega mögulegt að sameina um 35 kg/s af þéttivatninu skiljuvatninu og veita því niður í jarðhitageyminn um niðurrennslisholuna. Afganginum yrði eftir sem áður veitt á yfirborð. Með því að blanda saman þéttivatni og skiljuvatni er vökvinn einnig undirmettaður þannig að ekki er hætt á ópalútfellingum (Orkustofnun og Verkfræðistofa Guðmundar og Kristján's, 1994).

Niðurrennslisholunni er valin staður í jaðri jarðhitasvæðisins, þannig að vökvinn nái að hitna upp á leið sinni inn á aðalvinnslusvæðið. Frumathuganir benda til þess að ein niðurrennslishola geti annað allri virkjuninni, en nýta má sama borstæði ef bora þarf fleiri.

Fyrst um sinn verður ekki hjá því komist að losa affallsvatn á yfirborði. Borunum fylgir ávallt eitthvert frárennsli, en það vatn mun leita í þá farvegi sem fyrir eru á svæðinu þar sem sprungur taka við því. Til vara er komið fyrir skilju þannig að skiljuvatnið er leitt út um hljóðdeyfinn ef niðurrennslibúnaðurinn bilar. Við þrýstingslækkunina sýður skiljuvatnið og u.þ.b. 15 % rýkur út sem gufa. Afganginum, sem er um 80 kg/s fyrir 40 MW<sub>e</sub> virkjun verði veitt í affallslón. Í hljóðdeyfinum sýður vatnið og er hitastig þess því 100°C. Reynslan er sú að kólnun vatnsins sé hröð og er hitastig innrennslis í núverandi lóni um 40°C (Skv. hitamælingum Landsvirkjunar og Orkustofnunar). Þar er hins vegar fyrir vatn í miklu magni svo að kæling er hraðari. Það vatn sem nú fer niður í grunnvatnskerfið er um 35 °C.

Eins og áður sagði geta ýmis efni í jarðhitavökva orðið í skaðlegu magni. Eins og fjallað var um hér að framan sýna niðurstöður efnagreininga að vökvinn í Bjarnarflagi er tiltölulega efnasnauður og ekki talinn mengandi fyrir umhverfið. Losun affallsvatns á yfirborði verður einungis í undantekningartilfellum og ekki gert ráð fyrir að niðurdæling geti valdið neinni umhverfismengun. Á fyrirhuguðu virkjunarsvæði er grunnvatnsstreymi það mikið að írennsli affallsvatns hefur ekki áhrif á hita, efnasamsetningu eða sýrustig grunnvatns og því ekki á lífríki Mývatns. Eins og fram hefur komið eru efnasamsetning og lífríki Mývatns vel þekkt og undir reglubundnu eftirliti. Einnig er reiknað með ítarlegu eftirliti með grunnvatnskerfinu eins og lýst er hér á eftir. Áhrif virkjunar, ef einhver verða, ættu því að koma strax í ljós og gefa möguleika á viðbrögðum áður en skaðleg áhrif verða.

## 4. Mótvægisáðgerðir

### i. Gasútblastur

Fyrir liggur að gasútblastur mun a.m.k. þrefaldast við 40 MW virkjun í Bjarnarflagi.

Ekki er talin þörf á mótvægisáðgerðum vegna útblásturs gróðurhúsagasa ( $\text{CO}_2$  og  $\text{CH}_4$ ) þar sem óveruleg aukning verður á heildarútblastri þeirra við virkjun í Bjarnarflagi.

Varðandi styrk  $\text{H}_2\text{S}$  byggjast kröfur um hreinsibúnað fyrir útblástur á jarðhitasvæðum erlendis annað hvort á því að minnka eða komast fyrir óþægindi vegna lyktar eða minnka almennt styrk brennisteinsambanda í andrúmslofti og draga þannig úr sýringu regns og jarðvegs. Í Bjarnarflagi er náttúrulegt útstreymi og hveralyktin þar fyrir. Hreinsibúnaður fyrir útblástur frá 40 MW<sub>e</sub> virkjun mun því ekki eyða þessari lykt, þótt streymi brennisteinsvetnis út í andrúmsloftið muni vissulega minnka. Í kæliturni verður óþéttanlegum lofttegundum blásið upp og þær þynnast. Á opnum og vindasömum stöðum eins og í Bjarnarflagi, er ekki talin hætta á því að brennisteinsvetni né aðrar lofttegundir nái að safnast fyrir í lögðum eða lautum í skaðlegu magni. Eins og rakið var hér að framan benda niðurstöður nýlegra rannsókna til þess að lítil hluti brennisteinsvetnisins muni oxast yfir í brennisteinstvíoxíð og valda sýringu á lofti og jarðvegi. Sem dæmi má nefna að á Nesjavöllum, þar sem brennisteinsútblastur er mjög mikill, hefur brennisteinstvíoxíð mælst hæst 13,01  $\mu\text{g}/\text{m}$  (Magnús Á. Sigurgeirsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1996). Rannsóknir frá Svartsengi benda heldur ekki til þess að pH gildi regnvatns hafi lækkað (þ.e. regnvatn súrnað) eftir að virkjun hóf rekstur en þar var náttúrulegt útstreymi lítið áður en boranir hófust (Jón Örn Bjarnason, 1991). Eins og kom fram hér að framan stafar hár styrkur  $\text{SO}_2$  í mælingum í Bjarnarflagi af mengun frá Kísiliðjunni, en ekki af oxun  $\text{H}_2\text{S}$  yfir í  $\text{SO}_2$ . Því er ekki talið að styrkur brennisteinstvíoxíðs muni hækka við aukna nýtingu né að beinna mótvægisáðgerða sé þörf í þeim efnum.

Í Bjarnarflagi er því ekki gert ráð fyrir hreinsibúnaði fyrir  $\text{H}_2\text{S}$ . Möguleikinn á eyðingu lofttegunda verður þó að vera fyrir hendi, komi í ljós að hennar þurfi með. Gert er ráð fyrir að varmaskipti í eimsvala virkjunarinnar séu óbein. Gufan streymir þá utan um rörin og kælivatn streymir inni í þeim án þess að blandast. Óbeinn eimsvali hefur þann kost að aðgangur að ýmsum lofttegundum í gufunni er auðveldaður, verði þörf á að eyða þeim (Orkustofnun og Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns, 1994).

Verkfræðistofa Baldurs Líndal (1989) gerði tæknilegan samanburð á flestum þekktum aðferðum til eyðingar brennisteinsvetnis og komst að þeirri niðurstöðu að Stretfordferli, Súlferox- og Claus-aðferðir væru vænlegastar til nota á Nesjavöllum (tafla 4.1). Lauslegur verðsamanburður sýndi að Claus-aðferðin ætti að vera þeirra ódýrust í framkvæmd. VGK og Verkfræðistofa Baldurs Líndal (1993) komust að sömu niðurstöðu og lögðu línur fyrir slíka hreinsun í Nesjavallavirkjun. Var gert ráð fyrir að SELECTOX afbrigði aðferðarinnar yrði beitt en í því er notaður hvatni sem veldur því að oxun fer fram við lægra hitasig en ella og er því lítið um myndun aukaefna og brennisteinninn því að sama skapi hreinni. Gunnarsson o.fl. (í prentun) hafa þróað leið til að nota THIOPAQ® aðferðina til að hreinsa  $\text{H}_2\text{S}$  úr jarðhitagufu og komist að þeirri niðurstöðu að sú leið sé sú ódýrasta sem völ sé á til að hreinsa  $\text{H}_2\text{S}$  úr jarðhitagufu í Svartsengi. Líklegt er að svæðisbundinn munur sé á því hvaða aðferð hentar best. T.d.

er styrkur  $H_2S$  í jarðhitagufu mun meiri bæði í Námafjalli og á Nesjavöllum en í Svartsengi og þyrfti að gera sérstaka könnun á hvort THIOPAQ® aðferðin hentar eins vel á fyrrnefndu svæðunum og því síðarnefnda. Val á hreinsunaraðferð hefur ekki verið athuguð sérstaklega fyrir Bjarnarflag þar sem ekkert hefur komið fram sem bendir til að nauðsyn sé á gaseyðingu þar.

**Tafla 4.1.** Helstu leiðir til hreinsunar  $H_2S$  úr jarðhitagufu (Verkfræðistofa Baldurs Líndal, 1989, Gunnarsson o.fl., 2000).

Aðferð	Grunnferli	Stutt lýsing	Kostir-gallar
Gufubreytir	Þétting-suða	Þétt með varmaskipti, gas skilið frá. Varmi notaður til að mynda gufu	Verulegt varmatap
Stretford-ferli	Beint ísog	Oxun m. $V^{5+}$ sem afoxast í $V^{4+}$ en oxað er með ADA hvata í $V^{5+}$	V blandast myndefni sem getur þurft að hreinsa fyrir notkun
Hvötuð útskolun	Beint ísog	$H_2S$ (bruni,hvati)→ $SO_2$	Einungis 50% $H_2S$ oxast
Vftissódaútskolun	Beint ísog	$H_2S$ leyst í NaOH úða	Farga þarf myndefni og efnakostnaður mikill
Na-hýpóklórít-oxun	Beint ísog	Oxað í S + $SO_3$ , en hýpóklórít afoxað í klóríð	Lítill reynsla, efnakostnaður mikill
K-permanganat-oxun	Beint ísog	1-2% $KMnO_4$ oxar í $SO_3$ með myndun $MnO_2$	Efnakostnaður mikill
THIOPAQ®	Beint ísog	Thiobacillus gerlar oxa $S^{-2}$ í S	Verið að þróa f. jarðhitagas. Virðist ódýr
Bruna-útskolun	Bruni + ísog	Reykur skolaður m. vatni. $SO_3$ lausn bætt í þéttivatn	Ekki nema um 50% hreinsun
Ferrox	Bruni + ísog	Gas þjappað og kælt + 3% sóði, 0.5% FeO → FeS (oxun) → oxíð o.fl.	Mörg þrep. Losa þarf torleyst málmoxíð.
Súlferox	Bruni + ísog	$H_2S+Fe^{+3}→Fe^{+2}+S$ . haldið í lausn m. klóbindingi, oxað til baka í lofti	Myndefni markaðshæfur S
Hitaoxun	Bruni + ísog	Bruni+vftissódaúðun→ $SO_3$ +þéttivatn → þíósúlfat	Mikil og kostnaðarsöm basanotkun
CATOX®	Bruni + ísog	Hitaoxun m. $NH_3$ eða NaOH og hvata	Kostnaðarsöm
Claus	Bruni	$2H_2S+3O_2→2SO_2+2H_2O$ ; $SO_2+2H_2S→3S+2 H_2O$ (kurlað bauxít)	Söluhæft myndefni. Tiltölulega ódýr



Með niðurrennsli affallsvatns minnkar vatnsúði frá skiljustöð. Í kæliturni er gasið afloftað og dregur úr vatnsúða. Því er ekki talið að vatnsúði valdi vandræðum, umfram það sem nú þegar er. Fyrirhuguð virkjun verður einnig lítið eitt fjær byggðinni í Reykjahlíð en holurnar sem boraðar voru á sjötta og sjöunda áratugnum.

Að lokum er þó vert að geta þess að eftirlit með þessum gasefnum mun verða nauðsynlegur þáttur í rekstri virkjunarinnar. Kannað verður hvort styrkur þeirra breytist með tímanum og möguleg áhrif þeirra á umhverfið rannsökuð. Allar ákvarðanir um aukna nýtingu, og hvort eyða þurfi einhverjum lofttegundum í útblæstri munu byggjast á niðurstöðum þessara athugana.

Lagt er til að gerðar verði reglulegar mælingar á styrk og dreifingu  $H_2S$  á sama hátt og sýnt var á mynd 2.1 hér að framan. Jafnframt verði á byggingartíma virkjunarinnar gerðar verðurmælingar í talsverðri hæð frá jörðu þannig að unnt verði að búa til grundvöll fyrir reiknilíkan um dreifingu gasa í talsverðri fjarlægð frá virkjuninni. Gerð verði síðan dreifingarspá á grundvelli reiknilíkansins, sem síðan verði borin saman við raunmælingar eftir að rekstur virkjunar hefst. Eins og fram hefur komið mun dreifingarspá fyrir  $H_2S$  væntanlega vera ónákvæm og gefa mun hærri gildi en mæligildin vegna óstöðugleika þessarar gastegundar. Því munu endurteknar punktmælingar tengdar útreiknuðum margfeldisáhrifum vegna aukins útblásturs væntanlega sýna mun raunhæfari mynd af þeirri styrkukennngi sem verður í kjölfar virkjunar. Dreifingarspá byggð á reiknilíkani nær einnig aðeins að herma þá aukningu sem stafar af strompgufu en ekki auknu útstreymi frá gufuaugum í kjölfar niðurdráttar og aukinnar suðu í efri hluta jarðhitakerfisins.

## ii. Affallsvatn

Jarðhitakerfið í Bjarnarflagi hefur verið rannsakað mikið og efnasamsetning grunnvatns í næsta nágrenni er þekkt. Eins og fram kom í kaflanum hér á undan er jarðhitavatnið efnasnautt og aðeins efnin ál og arsen í hærri styrk en viðmiðunarstaðlar fyrir drykkjarvatn gera ráð fyrir. Í volga grunnvatninu á svæðinu er styrkur þessarra efna nú 20-100 sinnum lægri. Mjög gott yfirlit hefur fengist yfir efnasamsetningu grunnvatns í þeim rannsóknum fram hafa farið á undanförunum þremur árum og munu nýtast ágætlega sem grunnur að eftirliti í framtíðinni. Auk þeirra efna sem niðurstöður eru sýndar fyrir í skýrslu Halldórs Ármannssonar o.fl. í viðauka 1 hafa verið mæld næringarsölt í síðustu sýnum sem tekin voru haustið 1999. Í þessari greinargerð eru leiddar að því líkur að losun affallsvatns á yfirborði muni ekki reynast skaðleg lífríki Mývatns og efna- og varmbreytingar yrðu bundnar við lítið svæði. Þrátt fyrir það má líta á niðurdælingu affallsvatns sem mótvægisáðgerð gagnvart hugsanlegum efnabreytingum grunnvatns. Þegar til lengri tíma er lítið fæst einnig betri og lengri nýting á jarðhitageyminum, þó svo að upptaka úr svæðinu fyrir 40 MW<sub>e</sub> virkjun sé talin langt undir vinnslugetu jarðhitasvæðisins. Möguleiki er einnig á að veita þéttivatni niður í jarðhitageyminn.

Lagt er til að fylgst verði reglulega með hitastigi vatnsins og styrk allra helstu uppleystra efna, snefilefna og næringarsalta á þeim sýnatökustöðum (um 16 talsins) sem notaðir voru í fyrrgreindum grunnvatnsrannsóknum (mynd 2.3). Auk þess verði boraðar 2-4 grunnar borholur í nánd við vinnslusvæðið og hreinsuð gömul grunn

borhola vestan Kísiliðju til að fylgjast með hugsanlegum áhrifum vinnslunnar á grunnvatnkerfið. Þar yrði horft bæði til mögulegrar mengunar og jafnframt til þynningar vatnsins vegna minnkandi affalls.

Lagt er til að tekin verði reglulega sýni þrisvar á ári til eftirlits bæði vegna hugsanlegrar mengunar en ekki síður vegna mögulegrar þynningar grunnvatnsins vegna minnkandi jarðhitaaffalls. Jafnframt verði gerðar einfaldari mælingar mánaðarlega, þar sem mæld væru fáein valin efni t.d. leiðni, klóríð, bór og styrkur kísils.

## 5. Samanteknar niðurstöður

Óveruleg mengunaráhrif eru talin fylgja rekstri 40 MW jarðhitavirkjunar í Bjarnarflagi, bæði hvað varðar andrúmsloft, grunnvatn og jarðveg. Magn lofttegunda í útblæstri frá virkjuninni mun aukast eins og kemur fram í töflu 2.2.

Áhrif virkjunar í Bjarnarflagi á útstreymi gróðurhúsalofttegunda á Íslandi verða óveruleg, um 0,18 % aukning í heildarútblæstri koltíoxíðs (CO<sub>2</sub>) og metans (CH<sub>4</sub>).

Ekki er gert ráð fyrir að nauðsynlegt reynist að eyða brennisteinsvetni (H<sub>2</sub>S) úr gasútblæstri þrátt fyrir a.m.k. þrefalda aukningu útblásturs í 5700 tonn árlega. Kröfur um hreinsun útblásturs á jarðhitasvæðum byggjast annað hvort á að minnka eða komast fyrir óþægindi vegna lyktar, þar sem hún hefur ekki verið til staðar, eða minnka almennt styrk brennisteinsvetnis í andrúmslofti. Í Bjarnarflagi er nú náttúrulegt útstreymi og því brennisteinslykt. Ekki er reiknað með að lykt aukist við vinnslu en dreifing gassins getur aukist. Brennisteinsvetni er mjög hvarfgjarnt en athuganir benda til að í köldu, sólarlitlu og röku loftslagi eins og á Íslandi oxast óverulegur hluti þess yfir í brennisteinstvíoxíð og valdi sýringu rigningar og jarðvegs heldur falli út sem skaðlaus brennisteinn. Því er ekki hætt á að magn brennisteinstvíoxíðs (SO<sub>2</sub>) aukist með virkjun og ekki talin þörf á að eyða brennisteinsvetni. Hins vegar er gert ráð fyrir að koma megi slíkum búnaði fyrir, reynist það nauðsynlegt. Góð grunnþekking er til um styrk og dreifingu gassins á svæðinu.

Lagt er til reglulegt eftirlit (punktmælingar yfir jarðhitasvæðið) með aukningu H<sub>2</sub>S í útblæstri og afdrifum þess. Einnig að náttúrulegt útstreymi á svæðinu verði metið áður en virkjun er gangsett og fylgst síðan með því á rekstrartíma virkjunarinnar. Vegna þess hversu óstöðugt brennisteinsvetni er mun dreifingarspá byggð á líkanreikningum væntanlega gefa mun hærri niðurstöður en raungildi í mælipunktum jafndreifðum yfir svæðið.

Um 200 g af kvikasilfri berast nú árlega út með jarðhitagufunni og mun það magn væntanlega þrefaldast með virkjun svæðisins. Reiknað er með mjög staðbundinni uppsöfnun kvikasilfursins í jarðvegi og óverulegri dreifingu út af virkjunarsvæðinu með andrúmslofti.

Affallsvatn frá jarðhitasvæðinu er efnasnautt miðað við háhitavatn og uppfyllir að flestu leyti kröfur sem gerðar eru til drykkjarvatns. Styrkur áls, arsens og bórs er þó of hár. Í volga grunnvatninu á svæðinu er styrkur þessarar efna nú 20-100 sinnum lægri en viðmiðunarstaðlar fyrir drykkjarvatn gera ráð fyrir. Affallsvatni frá virkjuninni verður dælt aftur niður í jarðhitageyminn og verða heildaráhrif virkjunarinnar á efnasamsetningu og hitastig grunnvatns því í lágmarki.

Niðurstöður efnagreininga sýna að við niðurdælingu er ekki hætt á myndun þeirra útfellinga sem algengastar eru hér á landi. Því ætti niðurdæling að geta gengið án vandkvæða og þess ekki að vænta að grípa þurfi til losunar affallsvatns á yfirborði í venjulegum rekstri virkjunarinnar.

Frárennslisvatn frá kæliturni er eimað og afloftað. Ekki er talin hætt á að það hafi áhrif á efnasamsetningu grunnvatns. Áætlað er að veita þessu vatni á yfirborð og í grunnvatn um nærliggjandi sprungur. Vegna efnasamsetningar þess er ekki talin hætt

á að lón myndist af völdum útfellinga. Einnig er möguleiki á að veita stórum hluta þess niður í jarðhitageyminn.

Lífríki Mývatns er aðlagð að því að kísilríkt volgt vatn blandist grunnvatnsstraumum sem í það renna og fylgjast þarf með að það jafnvægi raskist heldur ekki á þann hátt að jarðhitaáhrif þverri vegna minnkandi náttúrulegs affalls frá svæðinu í kjölfar virkjunarinnar.

Lagt er til ítarlegt eftirlit með efnasamsetningu grunnvatns á grundvelli þeirra umfangsmiklu rannsókna sem fram hafa farið á gerð, eðli og uppruna grunnvatns á svæðinu undanfarin þrjú ár.

## 6. Heimildir

Ármannsson, H. and Kristmannsdóttir, H. 1992. Geothermal environmental impact. *Geothermics*, 21, 869-880.

Bragi Árnason 1976. Groundwater systems in Iceland traced by deuterium. *Vísindafélag Íslendinga*, 42, 236 s.

Brimblecombe, P. 1996. Air composition & chemistry. 2<sup>nd</sup> edition. Cambridge environmental chemistry, series 6. Cambridge University Press, 263 s.

Edner, H., Faris, G.W., Suneson, A., Svanberg, S., Bjarnason, J.O., Kristmannsdóttir, H. and Sigurðsson K.H. 1991. Lidar search for atmospheric mercury in Iceland geothermal fields. *J. Geophys. Res.* 96, 2977-2986.

Evrópusambandið 1998. Council Directive 98/83/EC, on the quality of water intended for human consumption.

Freyr Þórarinnsson 1980. Krafla. Viðnámsmælingar með fjórþólsaðferð sumarið 1979. Orkustofnun, OS-80013/JHD-07, 54 s.

Freyr Þórarinnsson og Bára Björgvinsdóttir 1980. Krafla – Námafjall. Grunnvatnshæð. Orkustofnun, FP/BB-80/01, 3 s.

Friedman, I., Gíurgeirsson, Th. and Garðarsson, Ö. 1963. Deuterium in Iceland waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 27, 553-561.

Gretar Ívarsson, Magnús Á. Sigurgeirsson, Einar Gunnlaugsson, Kristján H. Sigurðsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1993. Mælingar á gasi í andrúmslofti. Styrkur brennisteinsvetnis, brennisteinsdíoxíðs og kvikasilfurs á háhitasvæðum. Orkustofnun, OS-93074/JHD-16, 69 s.

Gunnarsson, G., Janssen, A.J.H. and Buisman, C.J. 2000. The THIOPAQ® gas desulfurisation process for H<sub>2</sub>S removal from geothermal CO<sub>2</sub>. WGC 2000.

Halldór Ármannsson 1993. Jarðhitakerfið í Námafjalli – Efnafræðileg úttekt. Orkustofnun, OS-93053/JHD-29 B, 30 s.

Halldór Ármannsson, Sverrir Þórhallsson og Einar T. Elíasson 1991. Helstu áhrif virkjunar jarðhita á umhverfið. Erindi flutt á ársfundi Orkustofnunar.

Halldór Ármannsson, Hrefna Kristmannsdóttir og Magnús Ólafsson, 1998. Krafla - Námafjall. Áhrif eldvirkni á grunnvatn. Orkustofnun, OS-98066, 30 s.

Hrefna Kristmannsdóttir, Steinunn Hauksdóttir, Guðni Axelsson, Magnús Ólafsson og Halldór Ármannsson, 1999. Ferilprófun á Mývatnssvæðinu. Unnið fyrir Landsvirkjun OS-99028, 48s.

Jón Örn Bjarnason 1991. *Um sýrustig úrkomu í Svartsengi*. Orkustofnun, JÖG-91/02.

Jón Ólafsson 1978: Kvikasilfur og arsen í borholum við Kröflu og Námafjall. *Náttúrufræðingurinn*. 48, 52-57.

Jón Ólafsson 1991. Undirstöður lífríkis í Mývatni. *Náttúra Mývatns*. Hið Íslenska Náttúrufræðifélag, Reykjavík.

- Kollikho, P.W. 1999. Hydrogen sulphide dispersion modelling for the Svartsengi geothermal power plant, SW-Iceland. UNU Geothermal training programme 1998, report 7, 189-215.
- Kristmannsdóttir, H., Sigurgeirsson, M., Ármannsson, H. and Hjartarson, H., 1997. Emission, Dispersion and Reaction of H<sub>2</sub>S in Steam from Geothermal Fields in Iceland. Proceedings of NEDO International Geothermal Symposium, March 11 & 12, 1997 at Sendai, Japan, 261-269.
- Kristmannsdóttir, H., Sigurgeirsson, M., Ármannsson, H., Hjartarson, H. and Ólafsson, M., 1999. Sulphur gas emission from geothermal power plants in Iceland. Geothermics, in press.
- Magnús Ólafsson, Magnús Á. Sigurgeirsson og Sverrir Þórhallsson, 1997. Áhrif úða og tæringar á fjórum háhitasvæðum. Orkustofnun, OS-97069.
- Magnús Á. Sigurgeirsson og Hrefna Kristmannsdóttir, 1996. *Mælingar á brennisteinsgösum í andrúmslofti - Styrkur brennisteinsvetnis og brennisteinsdíoxíðs á Nesjavöllum og í Bjarnarflagi*. Orkustofnun, OS-96019/JHD-10 B, 24 s.
- Magnús Á. Sigurgeirsson, Kristján H. Sigurðsson og Hrefna Kristmannsdóttir. *Mælingar á brennisteinsgösum í andrúmslofti. - Styrkur brennisteinsvetnis og brennisteinsdíoxíðs við Svarstengi og Kröflu*. Orkustofnun, OS-95025/JHD-18 B, 34 s.
- Magnús Á. Sigurgeirsson og Sverrir Þórhallsson 1996. *Úði og tæring við orkuverin á Nesjavöllum og við Kröflu*. Orkustofnun, OS-96023/JHD-12 B, 23 s.
- Ministry for the Environment 1995: *Status Report for Iceland - Pursuant to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Ministry for the Environment, Reykjavík.
- Nooroolahi, Y. 2000. H<sub>2</sub>S and CO<sub>2</sub> dispersion modelling for the Nesjavellir geothermal plant and preliminary geothermal environmental impact assessment for Theistareykir area, NE-Iceland. UNU Geothermal training programme 1999, in press.
- Orkustofnun og Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns 1994. *Jarðvarmavirkjun í Bjarnarflagi - Verkhönnun*.
- Ólafsson, J. 1979. The chemistry of Lake Mývatn and river Laxá. *Oikos*, 32. Pétur M. Jónasson (ritsj.), Hið íslenska fræðafélag í Kaupmannahöfn, Kaupmannahöfn, s. 82-112.
- Ólafsson, M. and Kristmannsdóttir, H., 1989. The influence of volcanic activity on groundwater chemistry within Námafjall geothermal system, North Iceland. In: *Water Rock Interaction*. D. Miles (ed.). Balkema, Rotterdam, 537-540.
- Umhverfissráðuneytið 1992: *Útstreymi gróðurhúsalofttegunda á Íslandi árið 1990*. Sérfræðinganefnd Umhverfissráðuneytisins.
- U. S. Department of Agriculture 1954. Handbook No. 60.
- Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns og Verkfræðistofa Baldurs Líndal 1993. *Nesjavallavirkjun. Förgun brennisteinsvetnis*. 118 s.
- World Health Organization (WHO) 1984. Guidelines for drinking-water quality. Volume 2, Health criteria and other supporting information, 335 s.

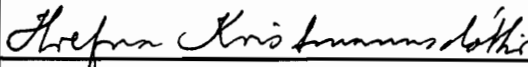
de Zeeuw, E. and Gíslason, G. 1988. The effect of Volcanic Activity on the Geothermal System in the Námafjall Geothermal Area, NE Iceland. Orkustofnun, OS-88042/JHD-07, 39 s.

Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson, 1983. Kísiliðjan við Mývatn. Grunnvatnsrannsóknir. Orkustofnun, OS-83118/VOD-10, 42 s.

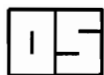
**ORKUSTOFNUN**

Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Lykilsíða

<b>Skýrsla nr.:</b> OS-98066	<b>Dags.:</b> Október 1998	<b>Dreifing:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
<b>Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill:</b> KRAFLA-NÁMAFJALL Áhrif eldvirkni á grunnvatn	<b>Upplag:</b> 30	
	<b>Fjöldi síðna:</b> 33	
<b>Höfundar:</b> Halldór Ármannsson Hrefna Kristmannsdóttir Magnús Ólafsson	<b>Verkefnisstjóri:</b> Hrefna Kristmannsdóttir	
<b>Gerð skýrslu / Verkstig:</b> Grunnvatnsrannsókn, áfangaskýrsla	<b>Verknúmer:</b> 8-760133	
<b>Unnið fyrir:</b> Samstarfsverk Orkustofnunar og Landsvirkjunar		
<b>Samvinnuaðilar:</b> Að hluta unnið með styrk frá Rannsóknarráði Íslands		
<b>Útdráttur:</b> <p>Gerð er grein fyrir samstarfsverkefni Orkustofnunar og Landsvirkjunar um grunnvatnsrannsóknir á Kröflu- Námafjallssvæðinu. Samkvæmt áætlun um verkefnið, sem hófst sumarið 1997, skyldi rannsaka efnainnihald og samsætuhlutföll í heitu og köldu vatni á Mývatns-Kröflu-Námafjallssvæði næstu 2 ár. Meginmarkmið þess er að skýra uppruna grunnvatnsstrauma og blöndun þeirra austan Mývatns, og meta breytingar með samanburði við eldri gögn. Í upphafi eru raktar fyrri rannsóknir, og síðan fjallað um framkvæmd og niðurstöður efnagreininga, rennislisleiðir grunnvatns og upp-töku efna í grunnvatni. Helstu niðurstöður eru þær að grunnvatni á Mývatnssvæði hefur verið skipt í fimm flokka eftir efna- og samsætusamsetningu. Talið er sennilegt að kalt grunnvatn sé af þrennum uppruna, þ.e. vatn runnið frá Kröflu og nágrenni, vatn frá Dalbjalls-, Hlíðarfjallssvæði og vatn komið langt sunnan að. Ekki hefur tekist að sýna fram á rennsli affalls frá Kröfluvirkjun beint til Mývatns. Frumkönnun á því hvort unnt er að rekja breytingu grunnvatns yfir í háhitavatn leiddi ekki til ákveðinnar niðurstöðu, en reikningar benda til að þrengja megi val á aðstæðum þannig að töluverð nálgun verði.</p>		
<b>Lykilorð:</b> Krafla-Námafjall, eldvirkni, grunnvatn, efnagreiningar, rennislisleiðir	<b>ISBN-númer:</b> 9979-68-024-5	
	<b>Undirskrift verkefnisstjóra:</b> 	
	<b>Yfirfarið af:</b> HK	





**ORKUSTOFNUN**

Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 8-760133

**Halldór Ármannsson  
Hrefna Kristmannsdóttir  
Magnús Ólafsson**

# **KRAFLA-NÁMAFJALL**

**Áhrif eldvirkni á grunnvatn**

**Samstarfsverk Orkustofnunar og Landsvirkjunar**

**OS-98066**

**Október 1998**

ISBN 9979-68-024-5

ORKUSTOFNUN: Kennitala 500269-5379 - Sími 569 6000 - Fax 568 8896  
Netfang [os@os.is](mailto:os@os.is) - Heimasíða <http://www.os.is>

**EFNISYFIRLIT**

1.	INNGANGUR	4
2.	FYRRI RANNSÓKNIR	4
3.	FRAMKVÆMD	5
4.	NIÐURSTÖÐUR EFNAGREININGA	7
5.	ÚRKOMA OG RENNSLISLEIÐIR GRUNNVATNS Á KRÖFLU- OG NÁMAFJALLSSVÆÐI	23
6.	UPPTAKA EFNA Í GRUNNVATN	23
7.	HELSTU NIÐURSTÖÐUR	30
8.	HEIMILDIR	31

**TÖFLUSKRÁ**

1.	Sýnatökustaðir	5
2.	Sýnatökur ágúst 1997 – ágúst 1998	7
3.	Upprunahópar grunnvatns á Mývatnssvæði	7
4.	Mældur hiti og kalsedónhiti í grunnvatnssýnum frá Kröflu og Námafjalli, ágúst 1997	7
5.	Niðurstöður efnagreininga	14
6.	Efnasamsetning basalts á Kröflusvæði (%). Stílfært meðaltal með ofgnótt $K_2O$	28
7.	Efnasamsetning vatns úr Austaraselslindum notað til títrunar (mg/kg)	29
8.	Samsetning eldfjallagass frá Surtsey (frá því snemma í gosi, mól %)	29
9.	Reiknuð efnasamsetning lindarvatns (ppm) eftir snertingu við berg og blöndun við eldfjallagas við 205°C	29
10.	Efnasamsetning djúpvatns í völdum holum í Kröflu og Námafjalli.	30

## MYNDASKRÁ

1.	Sýnatökustaðir	6
2.	δD á móti δ <sup>18</sup> O í sýnum af grunnvatni frá Kröflu og Námafjalli, regnlína, flokkun eftir δD hlutfalli	9
3.	Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> línurit fyrir grunnvatn frá Kröflu og Námafjalli	10
4.	Cl/100-Li-B/4 línurit fyrir grunnvatn frá Kröflu og Námafjalli	11
5.	B á móti Cl í sýnum af grunnvatni frá Kröflu og Námafjalli	12
6.	Cl á móti Cl/B í sýnum af grunnvatni frá Kröflu og Námafjalli	13
7.	Na/1000-K/100-√Mg línurit fyrir grunnvatn frá Kröflu og Námafjalli	21
8.	Hitastig í Grjótagjá nóvember 1996-júní 1998	22
9.	Hitastig í Stórugjá nóvember 1996-júní 1998	22
10.	Árleg úrkoma á Kröflu-Námafjallssvæði 1931-1960 miðuð við mælingar í Reykjahlíð og á Grímsstöðum á Fjöllum	24
11.	Grunnvatnshæð á Kröflu-Námafjallssvæði	25
12.	Vatnsborð í nokkrum Kröfluholum ágúst 1996-september 1997	26
13.	Krafla KJ-6. Vatnsborð 1976-1992	27
14.	Hola AB-02, Búrfellshrauni. Vatnsborð 1979-1998	28

## 1. INNGANGUR

Í skýrslunni segir frá samstarfsverkefni Orkustofnunar og Landsvirkjunar um grunnvatn á Kröflu- og Námafjallssvæðum sem að hluta var unnið að með styrk frá Rannsóknaráði Íslands.

Vinna við verkefnið hófst sumarið 1997 og hljóðaði áætlun fyrir það upp á rannsóknir á efnainnihaldi og samsætuhlutföllum í heitu og köldu vatni á Mývatns-Kröflu-Námafjallssvæði næstu 2 ár. Meginmarkmiðið er að skýra uppruna grunnvatnsstrauma og blöndun þeirra austan Mývatns og jafnframt hugsanlegar árstíðasveiflur. Um leið á að taka saman eldri gögn og meta breytingar út frá þeim og hinum nýrri.

Grunnvatnskerfið er samsett úr nokkrum meginstraumum. Hluti er aðrunninn langt sunnan af hálandi landsins en hluti er staðbundinn og kemur úr nærliggjandi fjallendi. Jarðhitakerfi og eldsumbrot hafa haft veruleg áhrif á efnainnihald grunnvatns á þessu svæði, bæði til skamms og langs tíma.

Ætlunin er að varpa ljósi á áhrif eldvirkni á háhitakerfi og áhrif jarðhitavinnslu á grunnvatnskerfi í nágrenni háhitasvæða. Ennfremur verður reynt að skýra samþil staðbundins grunnvatns og fjarlægs aðrunnins vatns.

Þannig er stefnt að því að fá heildarmynd af uppruna og rennislleiðum grunnvatns á þessum slóðum og mun hún auðvelda mat á umhverfisáhrifum fyrirhugaðra virkjana og annarra mannvirkja á viðkvæmt lífríki og leit að leiðum til tiltölulega óskaðlegrar auðlindanýtingar.

## 2. FYRRI RANNSÓKNIR

Darling and Ármannsson (1989) sýndu fram á að vatn í jarðhitakerfinu í Kröflu er staðbundið grunnvatn en vatn í kerfinu í Námafjalli aðrunnið sunnan úr hálandinu. De Zeeuw and Gíslason (1988) og Ólafsson and Kristmannsdóttir (1989) sýndu fram á veruleg áhrif eldsumbrota á grunnvatnskerfið í Námafjalli, sem hitnaði um leið og efnainnihald vatnsins gjörbreyttist. Jafnframt rann þá mikið kalt vatn niður í dýpri hluta jarðhitakerfisins í Bjarnarflagi og grunn kvikuinnskot ullu tímabundnu yfirkrítísku ástandi í hlutum þess kerfis (Ásgrímur Guðmundsson o.fl. 1989, Ómar Sigurðsson 1993, Tole o. fl. 1993). Þá er ógetið áhrifa kvikugasa á jarðhitakerfið í Kröflu sem hafa dvínað en gætir þó enn (Ármannsson o. fl. 1982, 1989, Truesdell o. fl. 1989, Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson 1997).

Eðlisástandi jarðhitakerfanna og efnainnihaldi vökva þeirra hefur verið lýst (Ármannsson o. fl. 1987, Halldór Ármannsson 1993). Talsverð vinna hefur verið lögð í að meta áhrif breytinga á vinnslueiginleika en minni í að kanna uppruna vatnsins og langtímabreytingar á samsetningu þess. Lýst hefur verið rannsóknum á og hugmyndum um grunnvatnskerfin (Stefán Arnórsson og Einar Gunnlaugsson 1976, Guttormur Sigbjarnarson o.fl. 1974, Halldór Ármannsson 1995, Björn Jóhannesson 1980, Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson 1983). Ekki hefur verið fylgst reglulega með afdrifum affalls frá virkjununum, en Orkustofnun hefur séð um töku sýna á fáeinum stöðum þó að ekki hafi verið unnið mikið úr þeim.

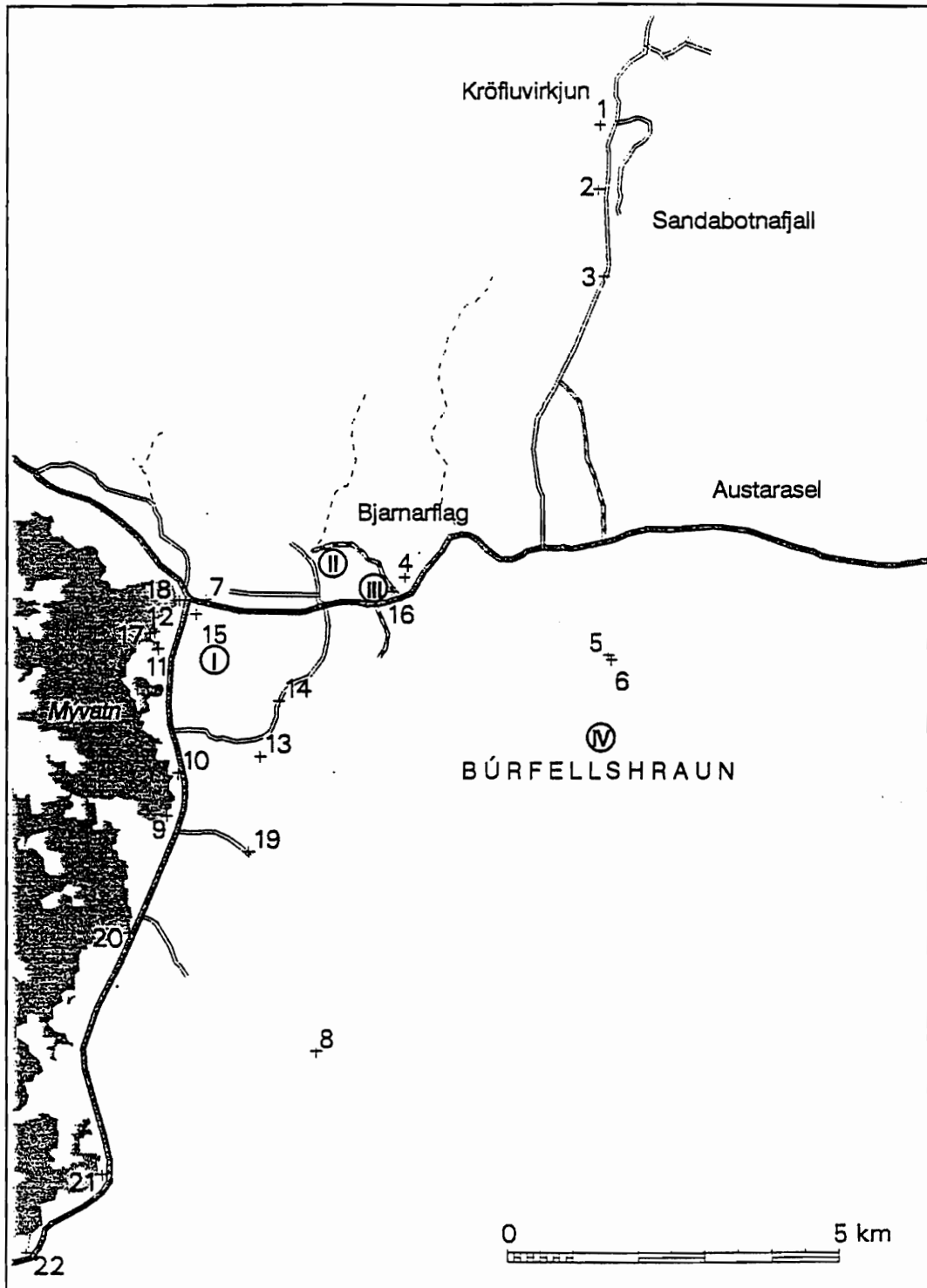
### 3. FRAMKVÆMD

Farin var sýnatökuferð í ágúst 1997 og safnað 18 sýnum á völdum stöðum. Í ljósi niðurstaðna voru sex þessara staða valdir til sýnatöku á 2ja mánaða fresti og sáu starfsmenn Landsvirkjunar um þá framkvæmd. Í sýnatökuferð í júní 1998 var bætt við 4 stöðum sem einnig eru notaðir við ferilprófanir sem eru í gangi á Kröflu-Námafjallssvæði. Staðsetning sýnatökustaða var ákvörðuð með GPS gervitunglaviðtæki og er staðsetning sýnd í töflu 1. Á hverjum stað var yfirleitt safnað 100 til 200 punktum og staðsetning síðan leiðrétt eftir á. Allir sýnatökustaðir eru sýndir á mynd 1. Eftirfarandi þættir voru mældir í fyrstu 18 sýnunum: pH, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, B, leiðni, SiO<sub>2</sub>, Li, Na, K, Mg, Ca, F, Cl, Br, SO<sub>4</sub>, Al, Cr, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Pb, heildarstyrkur uppleystra steinefna, δD og δ<sup>18</sup>O. Auk þess var Hg mælt í 3 þeirra. Í sýnum sem tekin eru á 2ja mánaða fresti er mælt: pH, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, B, SiO<sub>2</sub>, Na, K, Mg, Ca, Cl, SO<sub>4</sub> og δ<sup>18</sup>O en leitast er við að mæla sömu þætti og í 18 fyrstu sýnunum einu sinni á ári og var það haft í huga í sýnatökuferð í júní 1998 (töku nr. 6, sbr. Töflu 2).

Tafla 1. Sýnatökustaðir (hnatthnit WGS-84)

Nr.	Staður	Breidd	Lengd	Hæð m. y.s.
1	Sandabotnalind-Dæluskúr, Kröflu	65°42'10,706"	16°46'24,629"	468
2	AE-01 Gamla kaldavatnsholan, Kröflu	65°41'40,208"	16°46'27,554"	457
3	Hlíðardalslækur v/Skarðssel	65°40'58,223"	16°46'23,343"	393
4	Austaraselslindir.-Varmaskiptastöð, Bjarnarflagi	65°38'34,207"	16°50'27,309"	357
5	AB-02, Búrfellshrauni	65°37'54,157"	16°46'26,291"	349
6	Hlíðardalslækur v/AB-02	65°37'51,651"	16°46'23,014"	349
7	AF-01, Helluhrauni 12, Reykjahlíð	65°38'25,216"	16°54'23,420"	291
8	Helgagjá, sunnan Dimmuborga.	65°34'44,560"	16°52'21,933"	284
9	Vogafló. Lind á bakka Mývatns	65°36'40,490"	16°55'13,922"	279
10	Langivogur. Lind á bakka Mývatns	65°37'00,953"	16°55'00,011"	282
11	Helgavogur. Lind á bakka Mývatns	65°38'01,360"	16°55'21,172"	279
12	Norðan Helgavogar Lind á bakka Mývatns	65°38'09,455"	16°55'25,427"	277
13	Vogagjá (Leynigjá), sunnan í Grjótagjá	65°37'08,410"	16°53'22,464"	292
14	Grjótagjá-karlagjain	65°37'35,020"	16°52'58,728"	287
15	Stóragjá við aðalop	65°38'18,037"	16°54'35,341"	288
16	Glerhallarvatn-affallslón, Bjarnarflagi rétt N vegar	65°38'27,310"	16°50'42,354"	320
17	Helgavogur. Dælustöð Kísiliðjunnar, brunnur	65°38'08,707"	16°55'30,332"	281
18	Bjarg. Lind á bakka Mývatns	65°38'25,186"	16°54'54,781"	279
19	Hverfjallsgjá	65°36'22,005"	16°53'37,686"	283
20	Strandarvogur. Lind á bakka Mývatns	65°35'43,184"	16°56'01,081"	277
21	Grjótavogur. Lind á bakka Mývatns	65°33'46,464"	16°56'38,261"	280
22	Garðslind	65°33'09,362"	16°58'08,533"	279

Í töflu 2 er yfirlit um sýnatökur:



Mynd 1. Sýnatökustaðir 1997 – 1998 eru númeraðir frá 1 – 22. Einnig eru sýndir staðir þar sem ferilefni voru sett niður 1981 (I), 1982 (II) og 1998 (III)

Tafla 2. Sýnatökur ágúst 1997 – ágúst 1998

Taka nr.	Dagsetning	Sýni nr.
1	1997.08.08 - 11	1997-0438 – 0455
2	1997.11.14 - 15	1997-0701 – 0707
3	1998.01.22	1998-0011 – 0016
4	1998.04.01	1998-0251 – 0256
5	1998.05.12	1998-0290 – 0295
6	1998.06.16 - 20	1998-0334 – 0355
7	1998.08.25	1998-0461– 0466

#### 4. NIÐURSTÖÐUR EFNAGREININGA

Niðurstöður þeirra efnagreininga, sem fyrir liggja, eru sýndar í Töflu 3. Tvívætnishlutfall er breytilegt frá  $-80.4$  að  $-92.9$  ‰ og súrefnis-18 hlutfall frá  $-5.97$  að  $-12.85$  ‰ og því augljóst að uppruni vatnsins er allmismunandi. Var vatninu skipt í 6 hópa á grundvelli tvívætnis- og súrefnis-18-hlutfalla (Tafla 3).

Tafla 3. Upprunahópar grunnvatns á Mývatnssvæði

Hópur nr.	Sýnatökustaðir nr.
I	3, 6
II	1, 2, 4
III	5, 7, 11, 12, 15, 17, 18
IV	8, 9, 19, 20, 21, 22
V	10, 13, 14
VI	16

Eins og við var að búast skera sýni úr Hlíðardalslæk annars vegar og Glerhallarvatni hins vegar sig úr og bera einkenni affallsvatns úr jarðhitakerfunum í Kröflu (Hópur I) og Námafjalli (Hópur VI). Hinum sýnunum má skipta í 4 hópa eftir tvívætnis- og súrefnis-18 hlutföllum. Á mynd 2 er dregið  $\delta D$  á móti  $\delta^{18}O$ , sýndar regnlínur og flokkar miðaðir við  $\delta D$  auðgreindir. Svo virðist sem vatnið í flokkum I til III sé staðbundið að uppruna en vatnið í hópum IV og V, þ.e. vatn frá suðausturhluta rannsóknarsvæðisins, komið sunnan að. Nokkur dreifing er á gildum fyrir helstu anjónir,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  og  $HCO_3^-$ , sem dregin eru á línurit á mynd 3. Hlutfall klóríðs er alls staðar lágt en afstæður styrkur sulfats og karbónats mismunandi. Má ætla að sulfatstyrkur ráðist af áhrifum jarðhita. Þar greinast hópar I og VI frá vegna háa sulfatinnihalds enda um affall frá háhitavatni að ræða. Vatn úr hópi V sýnir nokkuð dreift sulfathlutfall og getur það bent til einhverrar en mismikillar blöndunar við háhitavatn. Nokkur súrefnistilfærsla kemur og fram í hópi V (mynd 2) og styður hún þessa túlkun. Allt vatn úr hópi III er mjög svipað og sýnir einhver jarðhitaáhrif. Afstæður sulfatstyrkur er síðan minni í hópi IV og minnstur í hópi II sem er kalt grunnvatn sem sennilega hefur ekki orðið fyrir miklum áhrifum af jarðhita.

Önnur leið til að gera sér grein fyrir uppruna og rennislíleiðum er að líta á efni sem ekki taka þátt í útfellingar- eða jónaskiptahvörfum. Á mynd 4 er afstæður styrkur Li, B og Cl túlkaður með samanburði við styrk þeirra í bergi og afdrif við hugsanleg ferli, t.d. tap

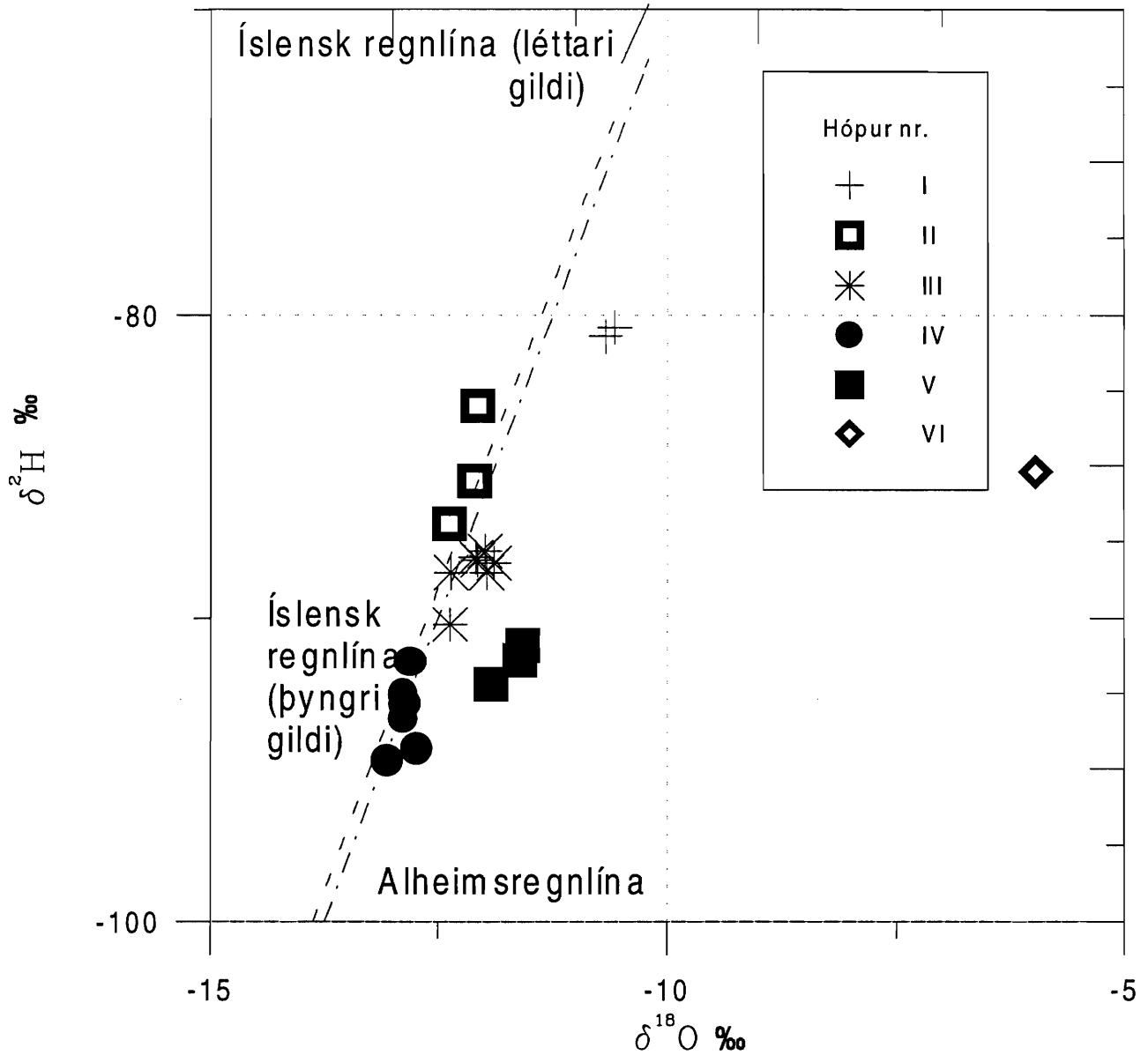
eða ísog efnanna og ísog kvikugufu (Giggenbach 1991). Teiknast niðurstöðurnar á það svæði sem gerir ráð fyrir leysingu úr bergi en ísog gufu síðar og benda til að tiltölulega gamall jarðhiti ráði styrk þessara efna. Arnórsson (1995) hefur fjallað um afstæðan styrk klóríðs og bórs og gerir ráð fyrir að uppruni sé þrenns konar í íslensku jarðhitavatni, þ.e. regnvatn, leysing úr bergi og jarðsjór. Á mynd 5 er B dregið á móti Cl en á mynd 6 Cl á móti Cl/B. Ekki er unnt að sjá blöndun við jarðsjó og benda öll gildin til töluverðrar upptöku bórs úr bergi eftir að vatnið féll sem regn. Áhrifin eru mismikil, minnst í ferskvatnssýnum úr köldum lindum og holum (hópum II og IV og sýni úr AB-02 í hópi III) en mest í affalli frá háhitasvæðum (hópum I og VI) og langt að runnu vatni á bakka Mývatns sem orðið hefur fyrir áhrifum jarðhita (Hópi V).

Sé lítið til þeirra efna, sem hitastig stjórnar styrk á, er athyglisvert að kalsedónhiti er yfirleitt verulega miklu hærra en mældur hiti (tafla 4). Bendir það til vatns sem nýlega hefur kólnað en getur einnig verið til marks um blöndun við jarðhitavatn. Undir fyrri flokkinn falla augljóslega vatn úr Hlíðardalslæk og Glerhallarvatni og sennilega Grjótagjá, Vogagjá og Stóragjá. Aðrar volgar lindir eru að öllum líkindum blanda jarðhitaaffalls og kalds grunnvatns. Einhverra áhrifa frá jarðhitagasi gæti e.t.v. í Austaraselslindum og skýra þau styrk kísils og CO<sub>2</sub>, pH og kísilhita. Áhrif jarðhita á vatn í Sandabotnalindum eru og greinileg. Til að kanna slík áhrif nánar eru niðurstöður dregnar inn á Na/1000-K/100-√Mg graf (Giggenbach 1988) (mynd 7). Myndin bendir til kalds óþroskaðs vatns í öllum tilvikum. Þó virðist Na/K hiti á þröngu bili (180-220°C) og gæti þetta tvennt bent til blöndunar við svo heitt vatn fremur en snöggrar kólnunar.

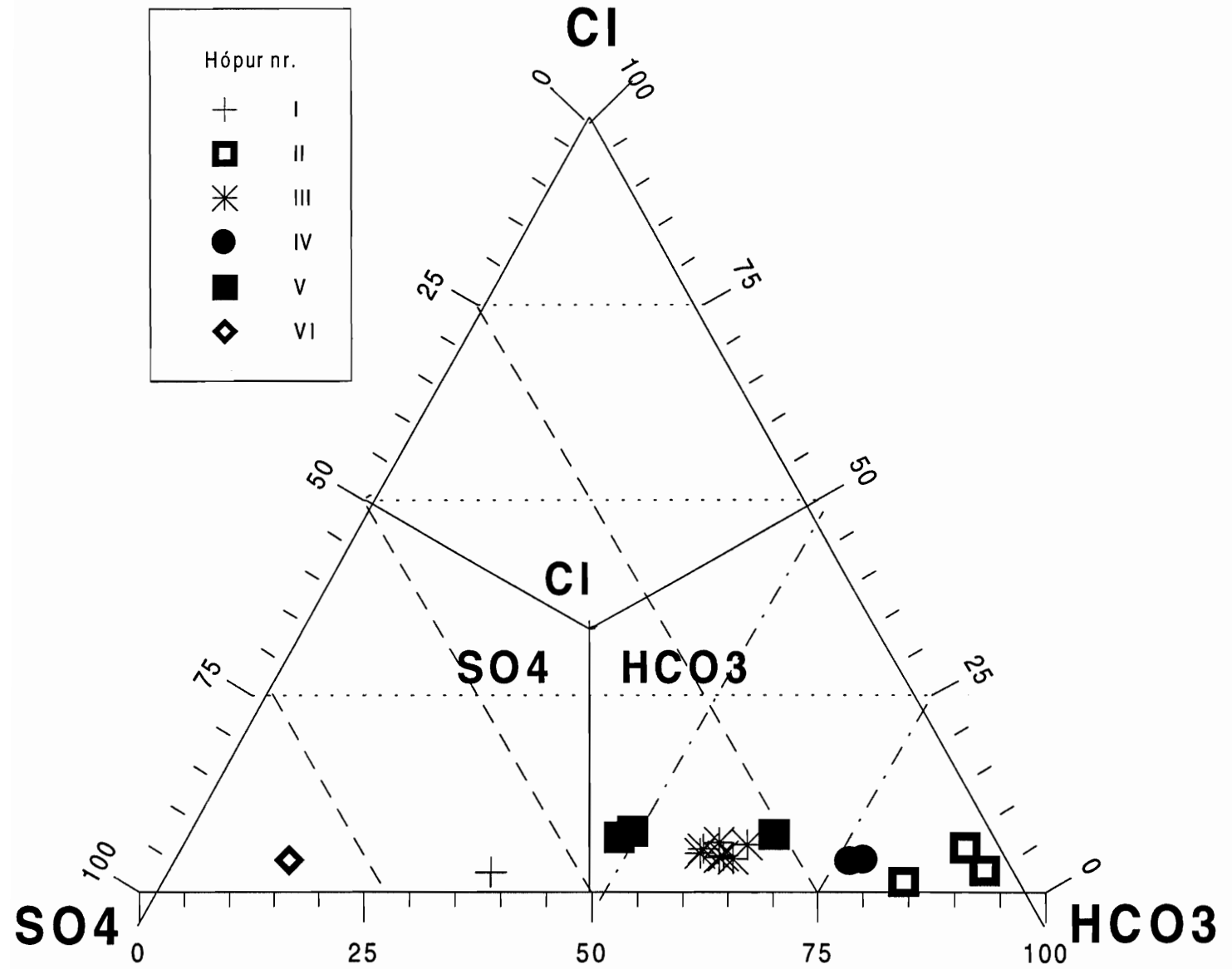
Tafla 4. Mældur hiti og kalsedónhiti í grunnvatnssýnum frá Kröflu og Námafjalli, ágúst 1997

Hópur nr.	Sýni nr.	Staður	Mældur hiti °C	Kalsedónhiti °C
I	440	Hlíðardalslækur við Skarðssel	13.6	137.6
I	443	Hlíðardalslækur v/holu AB-02	9.5	124.6
II	438	Sandabotnalind/Dæluskúr	13.2	47.1
II	439	Krafla/Gamla kaldavatnshola	26.5	113.2
II	441	Austaraselslindir/Dælustöð	4.1	43.7
III	442	Búrfellshraun/Hola AB-02	2.3	47.1
III	444	Reykjahlíð/Egilshola	30.8	105.3
III	448	Helgavogur S	26.2	94.1
III	449	Helgavogur N	26.3	102.0
III	452	Stóragjá	29.7	102.1
III	454	Helgavogur/brunnur	27.2	96.2
III	455	Bjarg/Eldá	20.3	83.7
IV	445	Helgagjá	6.5	31.9
IV	446	Vogaflói	5.7	32.4
V	447	Langivogur	24.8	109.5
V	450	Vogagjá	42.8	133.2
V	451	Grjótagjá/karlagjá	47.9	137.8
VI	453	Glerhallarvatn	35.7	187.0

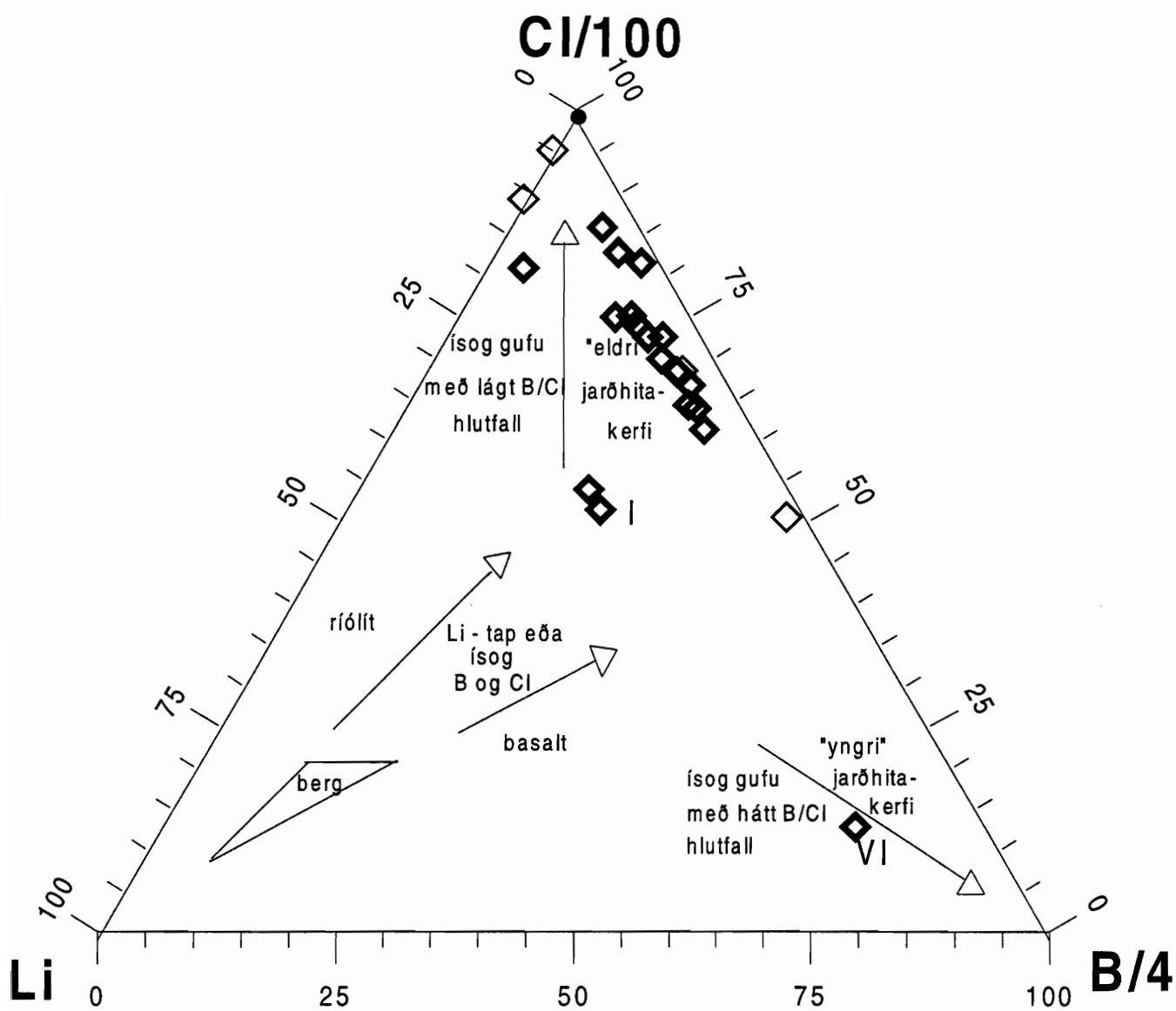




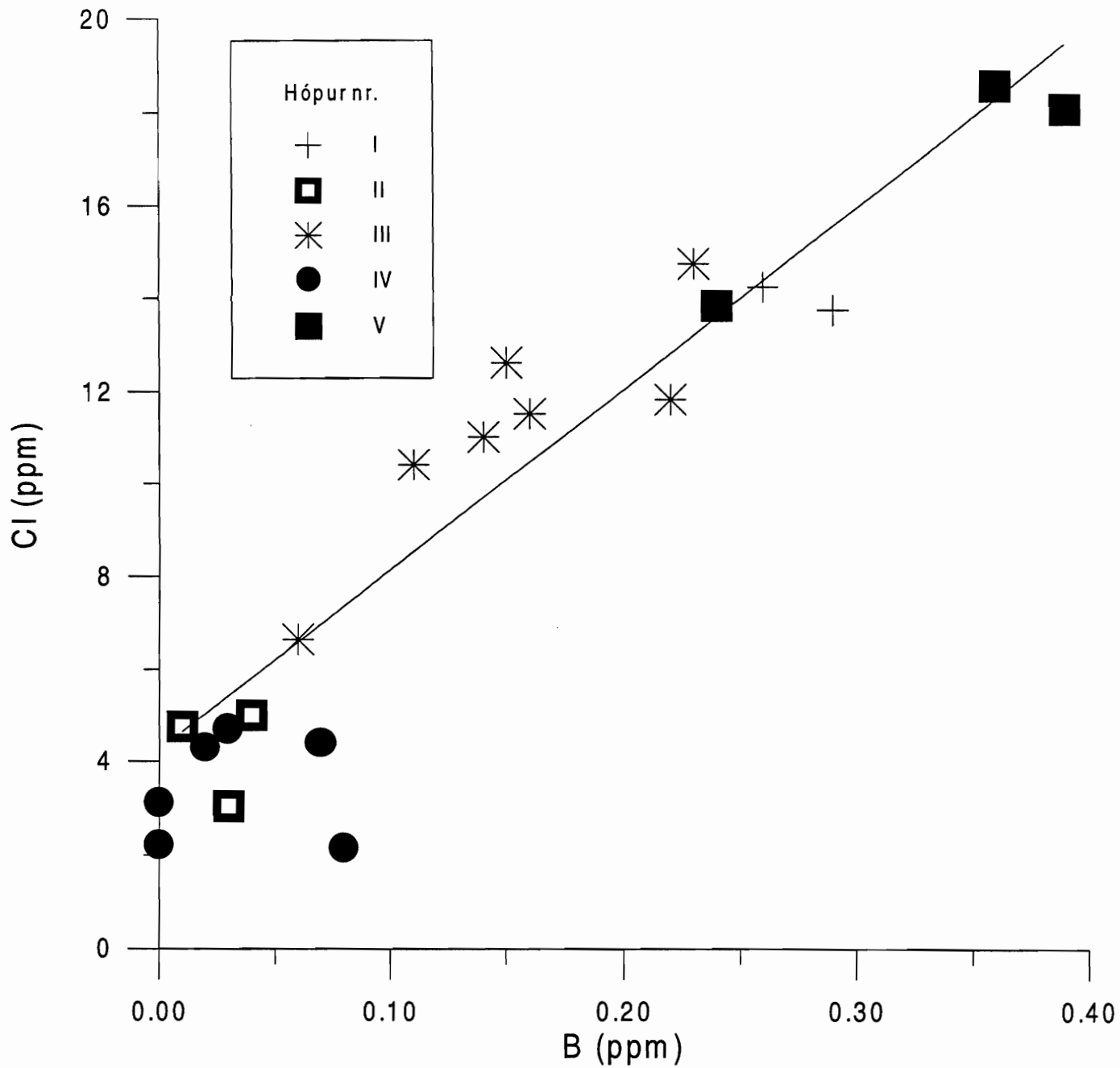
Mynd 2.  $\delta\text{D}$  á móti  $\delta^{18}\text{O}$  í sýnum af grunnvatni frá Kröflu og Námafjalli, regnlínur (Craig 1961, Sveinbjörnsdóttir o. fl. 1995), flokkun eftir  $\delta\text{D}$  hlutfalli



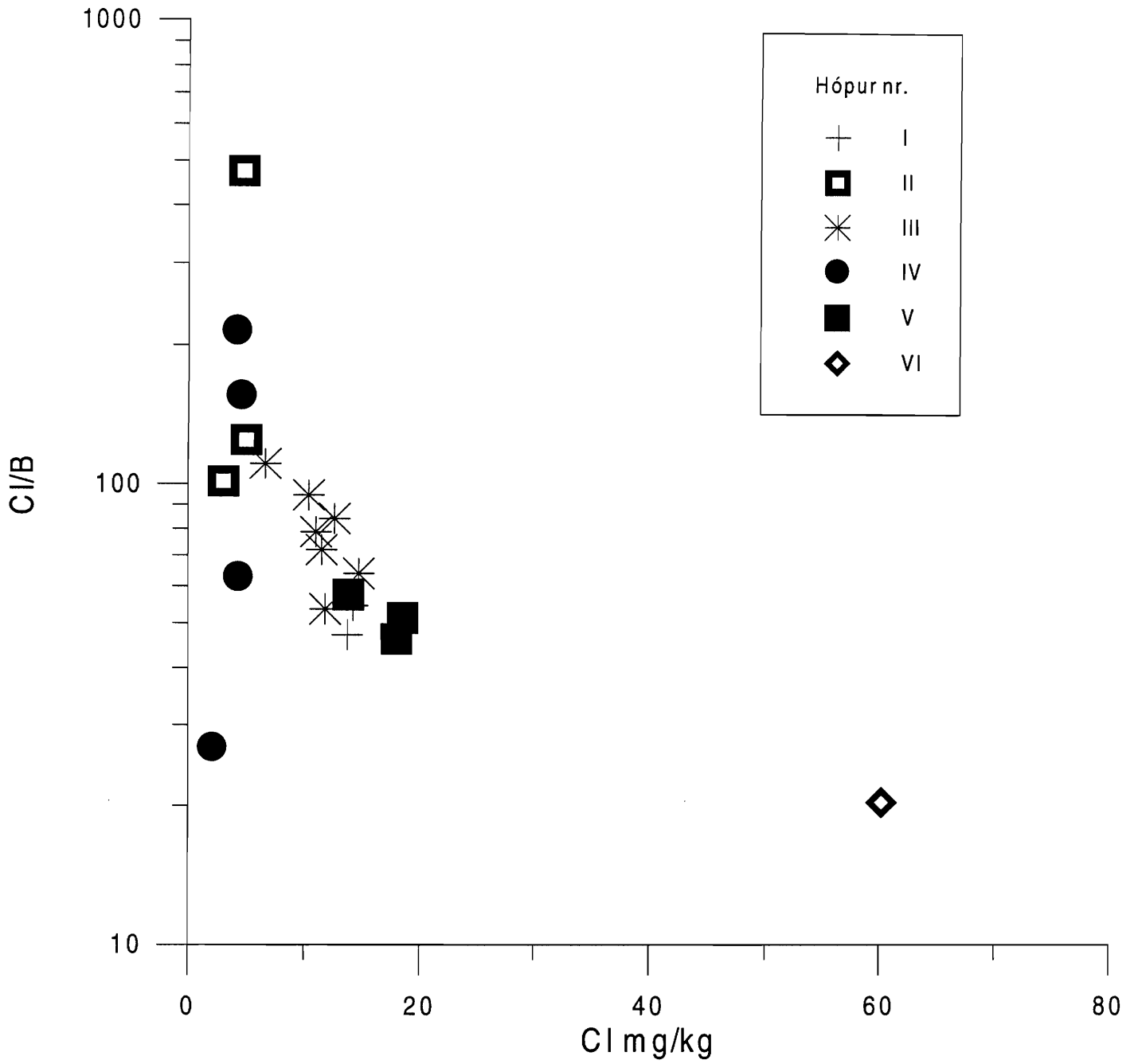
Mynd 3.  $\text{Cl}^--\text{SO}_4^{2-}-\text{HCO}_3^-$  línurit fyrir grunnvatn frá Kröflu og Námafjalli.



Mynd 4: Cl/100-Li-B Línurit fyrir grunnvatn frá Kröflu og Námafjalli



Mynd 5. B á móti Cl í sýnum af grunnvatni frá Kröflu og Námafjalli



Mynd 6. Cl á móti Cl/B í sýnum af grunnvatni frá Kröflu og Námafjalli

Tafla 5. Niðurstöður efnagreininga

Staður nr.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Taka nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Sýni nr.	438	705	11	251	290	351	465	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Hfiti (°C)	13.2	4.8	4.6	4.8	4.8	5.1	7.02/23	4.8	5.1	6.87/21	26.5	28.3	7.02/23	6.87/21	6.83/25	332.2
pH/°C	7.10/22	7.04/20	6.97/22	7.73/24	6.95/21	6.96/23	83.6	6.95/21	82.6	83.6	<0.03	<0.03	0.01	0.03	553	104.7
CO <sub>2</sub>	70.2	69.1	66.2	69.1	66.2	<0.03	<0.03	66.2	<0.03	<0.03	0.0030	0.0089	0.0089	0.012	0.0039	41.0
H <sub>2</sub> S	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
B	0.03															
Leiðni (µS/sm)/25°C	166	171	166	171	163	170	181	163	170	181	528	553	181	528	553	104.7
SiO <sub>2</sub>	29.4	29.4	29.3	29.5	29.5	29.9	29.8	29.5	29.9	29.8	104.5	104.7	29.8	104.5	104.7	377
Uppl. steinefni	93															
Li	0.0027															
Na	11.5	12.7	11.6	12.6	12.6	11.1	13.0	12.6	11.1	13.0	30.9	32.0	13.0	30.9	32.0	4.38
K	1.20	1.34	1.42	1.26	1.25	1.23	1.27	1.25	1.23	1.27	4.21	4.38	1.27	4.21	4.38	24.6
Mg	6.27	6.44	6.40	6.33	6.29	6.19	6.36	6.29	6.19	6.36	48.6	46.5	6.36	48.6	46.5	0.200
Ca	13.8	14.1	13.5	13.2	13.2	13.0	13.6	13.2	13.0	13.6	4.76	4.36	13.6	4.76	4.36	0.0039
F	0.116															
Cl	3.04	2.59	2.54	2.79	2.73	2.82	3.03	2.73	2.82	3.03	0.012	0.0039	3.03	0.012	0.0039	41.0
Br	0.009															
SO <sub>4</sub>	5.61	5.37	5.64	5.90	5.92	5.60	5.63	5.92	5.60	5.63	52.5	41.0	5.63	52.5	41.0	0.0039
Al	0.0030	0.0080														
Cr	0.0003															
Mn	0.0047	0.0010														
Fe	0.0460	0.0024														
Cu	0.0042															
Zn	0.0970															
As	<0.0001															
Hg																
Pb	<0.0002															
δD (‰ SMOW)	-83.0	-85.2														
δ <sup>18</sup> O (‰ SMOW)	-12.07	-12.04	-12.05	-12.03	-12.01	-12.01	-12.01	-12.01	-12.01	-12.01	-85.5	-82.7	-12.10	-85.5	-82.7	-12.16



Tafla 5. (frh.)

Staður nr.	5	6	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8
Taka nr.	1	6	1	6	6	1	2	3	4	5	6	7	8
Sýni nr.	442	347	444	349	348	445	707	16	255	294	343	464	464
Hiti (°C)	2.3	3.0	30.8	30.8	20.3	6.5	2.3	2.3	5.8	7.2	6.8	6.8	6.8
pH/°C	7.95/23	7.74/24	8.11/28	8.16/25	8.86/25	8.77/23	8.77/21	8.78/22	8.75/24	8.75/2	8.73/26	8.68/23	8.68/23
CO <sub>2</sub>	50.2	54.7	113.3	112.5	104.8	60.9	61.5	60.9	61.1	59.9	61.2	63.3	63.3
H <sub>2</sub> S	<0.03	0.05	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
B	0.06	0.07	0.23	0.22	0.58	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Leiðni (µS/cm)/25°C	205	214	477	507	886	199	207	204	206	197	214	218	218
SiO <sub>2</sub>	29.9	28.2	93.7	93.1	125.1	21.4	20.9	21.0	20.8	21.0	21.2	21.4	21.4
Uppl. steinefni	118	726	382	49	726	49	49	49	49	49	49	49	49
Li	0.0075	0.0074	0.0112	0.0121	0.1180	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0024	0.0024	0.0024
Na	17.7	16.4	66.8	68.8	147	21.7	23.4	21.2	23.8	23.6	21.7	24.0	24.0
K	2.08	2.10	6.02	6.26	16.8	1.69	1.81	1.90	1.74	1.73	1.72	1.82	1.82
Mg	6.04	6.36	5.24	5.40	6.57	5.88	5.40	6.23	6.04	5.96	5.96	5.96	5.96
Ca	13.7	13.6	25.6	25.8	22.5	10.7	11.4	10.4	10.9	10.5	10.6	10.6	10.6
F	0.253	0.230	0.302	0.340	0.710	0.235	0.235	0.235	0.235	0.235	0.235	0.235	0.235
Cl	6.65	6.27	14.7	12.8	26.1	4.29	3.59	3.61	3.80	4.15	3.85	4.12	4.12
Br	0.028	0.028	0.047	0.045	0.081	0.016	0.016	0.016	0.016	0.016	0.014	0.014	0.014
SO <sub>4</sub>	32.3	30.1	92.2	94.5	249	21.4	20.6	21.6	21.1	21.0	21.3	20.9	20.9
Al	0.0490	0.0620	0.0090	0.0075	0.5000	0.008	0.0060	0.0060	0.0060	0.0060	0.0104	0.0104	0.0104
Cr	0.0007	0.0017	0.0005	0.0005	0.0017	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
Mn	0.0110	0.0230	0.0002	0.0003	0.0220	0.0001	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	<0.0001	<0.0001	<0.0001
Fe	0.0720	0.0440	0.0025	0.0032	0.0440	0.0038	0.0010	0.0010	0.0038	0.0010	0.0006	0.0006	0.0006
Cu	0.0018	0.0023	0.0012	0.0012	0.0023	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
Zn	0.0435	0.0017	0.0012	0.0012	0.0017	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020
As	0.0015	0.0162	0.0001	0.0001	0.0162	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
Hg	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002
Pb	<0.0002	0.0003	<0.0002	<0.0002	0.0003	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002	<0.0002
δD (‰ SMOW)	-88.5	-86.9	-88.2	-88.2	-72.4	-91.5	-93.1	-93.1	-12.75	-12.75	-12.72	-12.80	-12.80
δ <sup>18</sup> O (‰ SMOW)	-12.36	-12.34	-11.89	-11.89	-8.10	-12.79	-12.76	-12.76	-12.75	-12.72	-12.80	-12.80	-12.80



Tafla 5. (frh.)

Staður nr.	9	10	10	10	11	11	12	12	13	13
Taka nr.	1	1	6	6	1	6	1	6	1	6
Sýni nr.	446	447	338	338	448	335	449	336	450	353
Hiti (°C)	5.7	24.8	22.8	22.8	26.2	26.0	26.3	26.2	42.8	42.0
pH/°C	8.66/23	8.56/23	8.53/24	8.53/24	8.23/23	8.30/21	8.20/23	8.20/23	8.39/23	8.47/24
CO <sub>2</sub>	64.3	70.1	83.0	83.0	112.0	109.6	108.0	107.1	86.4	91.0
H <sub>2</sub> S	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
B	0.03	0.23	0.46	0.46	0.11	0.26	0.15	0.28	0.36	0.37
Leiðni (µS/sm)/25°C	204	404	460	460	437	469	460	488	471	485
SiO <sub>2</sub>	21.4	102.9	126.7	126.7	77.5	85.7	88.7	83.8	146.5	145.2
Uppl. steinefni	130	339			287	339	291	354	396	
Li	0.0024	0.0027	0.0094	0.0143	0.0094	0.0104	0.0108	0.0114	0.0154	0.0156
Na	21.9	22.1	67.6	72.2	57.5	60.6	64.8	65.9	79.9	79.6
K	1.71	1.74	4.78	6.10	5.14	5.38	5.60	5.69	6.55	6.49
Mg	6.23	6.07	2.97	3.33	5.64	5.40	5.23	5.16	2.41	2.43
Ca	11.2	11.6	10.7	13.4	26.1	26.6	24.6	25.1	12.9	11.9
F	0.223	0.310	0.343	0.370	0.282	0.390	0.293	0.460	0.418	0.490
Cl	4.69	4.31	13.8	16.0	10.4	10.8	12.6	14.8	18.5	17.82
Br	0.017	0.015	0.048	0.055	0.038	0.036	0.007	0.040	0.064	0.063
SO <sub>4</sub>	20.3	20.2	85.4	84.4	78.9	90.4	89.4	81.9	98.6	97.1
Al	0.0160	0.0082	0.0320	0.0025	0.0080	0.0058	0.0360	0.0120	0.0180	0.0096
Cr	0.0010	0.0004	0.0004		0.0005		0.0005		<0.0001	
Mn	0.0001	<0.0001	0.0003	<0.0001	0.0001	<0.0001	0.0012	0.0002	<0.0001	0.0001
Fe	0.0013	0.0009	0.0037	0.0015	0.0018	0.0035	0.0297	0.0028	0.0011	0.0015
Cu	0.0025	0.0031	0.0031		0.0008		0.0015		0.0008	
Zn	0.0021	0.0031	0.0031		<0.0001		0.0038		0.0004	
As	0.0001	<0.0001			0.0001		0.0001		<0.0001	
Hg						<0.000005				
Pb	<0.0002	<0.0002			<0.0002		0.0002		<0.0002	
δD (‰ SMOW)	-92.9	-92.2	-92.2	-91.2	-88.0	-89.6	-88.9		-91.4	-92.1
δ <sup>18</sup> O (‰ SMOW)	-12.85	-11.92	-11.92	-11.61	-12.09	-12.08	-11.97	-11.95	-11.61	-11.61

Tafla 5. (frh.)

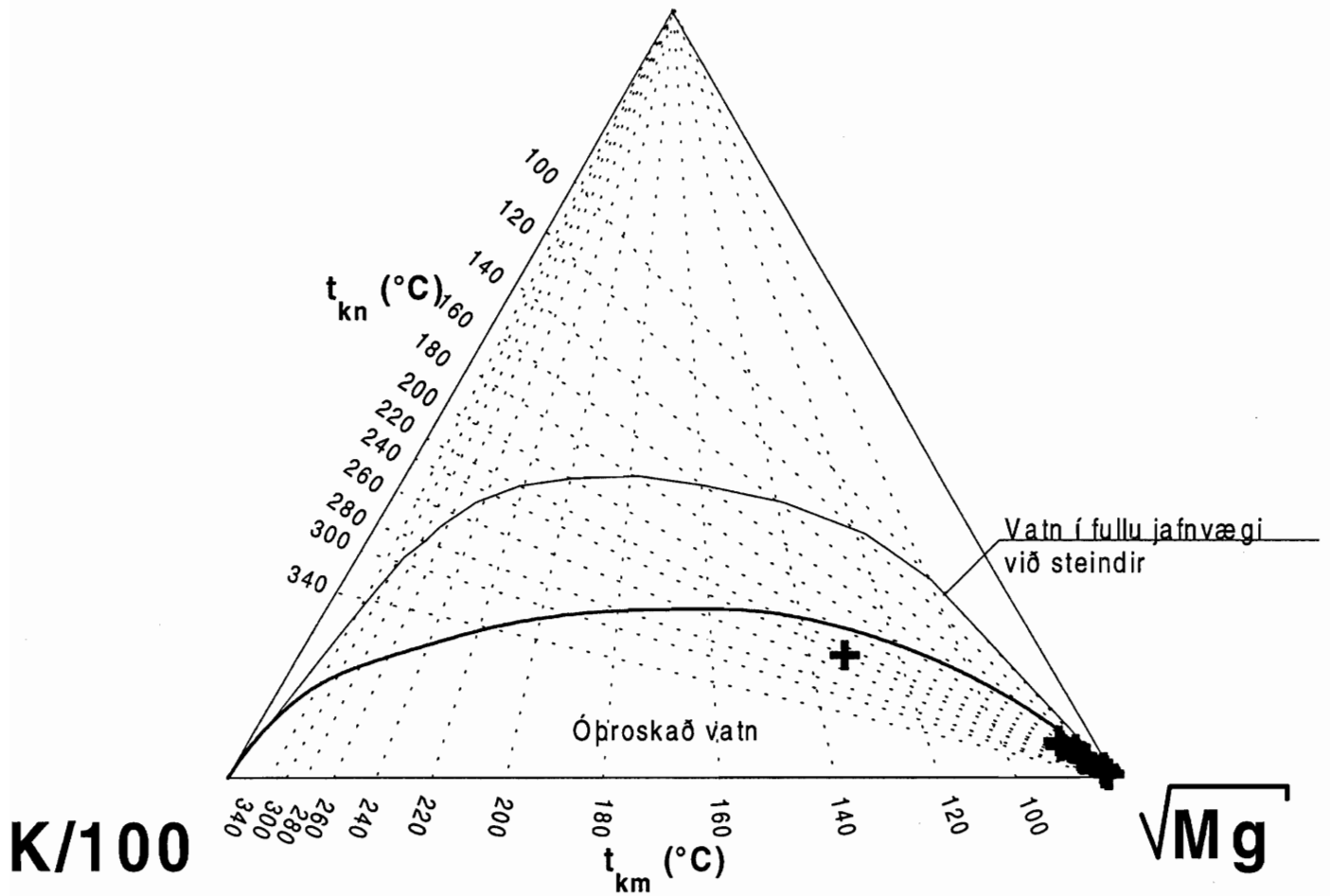
Staður nr.	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	15	15	15	16	16
Taka nr.	1	2	3	4	5	6	7	1	1	2	6	1	1	2	6	6	1	6	6
Sýni nr.	451	704	14	254	293	352	463	452	452	702	355	453	357	453	355	453	346	346	346
Hiti (°C)	47.9	47.7	47.5	47.2	47.3	47.1		29.7	29.7	29.3	29.5	35.7	35.0	29.3	29.5	35.7	35.0	35.0	35.0
pH/°C	8.23/24	8.30/22	8.31/22	8.29/24	8.30/23	8.27/24	8.35/23	8.24/24	8.24/24	8.25/22	8.21/24	7.04/24	7.68/24	8.24/24	8.21/24	7.04/24	7.68/24	7.68/24	7.68/24
CO <sub>2</sub>	116.5	110.9	110.4	111.6	110.4	111.7	115.7	117.7	117.7	114.8		30.1	35.9	114.8		30.1	35.9	35.9	35.9
H <sub>2</sub> S	0.06	0.06	<0.03		<0.03	0.06		<0.03	<0.03		<0.03	0.14	0.11	<0.03	<0.03	0.14	0.11	0.11	0.11
B	0.39	0.32				0.35		0.22	0.22	0.17	0.20	2.96	3.11	0.17	0.20	2.96	3.11	3.11	3.11
Leiðni (µS/sm)/25°C	465	459	445	444	428	453	469	492	492	511	502	825	813	511	502	825	813	813	813
SiO <sub>2</sub>	155.5	154.6	158.1	153.8	152.6	154.1	158.8	89.3	89.3	87.6	89.4	280.8	143.1	87.6	89.4	280.8	143.1	143.1	143.1
Uppl. steinefni	409	425						337	337	383		1094		383		1094			
Li	0.0170					0.0174		0.0110	0.0110		0.0118	0.1311	0.1370	0.0110	0.0118	0.1311	0.1370	0.1370	0.1370
Na	75.7	77.1	73.2	78.1	78.6	75.3	80.4	65.0	65.0	68.4	66.6	142	144.3	68.4	66.6	142	144.3	144.3	144.3
K	7.35	8.40	7.48	7.31	7.36	7.35	7.57	5.86	5.86	6.26	6.07	20.1	21.2	6.26	6.07	20.1	21.2	21.2	21.2
Mg	2.91	2.92	3.04	3.01	2.98	3.00		5.54	5.54	5.85		0.29	0.34	5.85		0.29	0.34	0.34	0.34
Ca	12.8	13.2	12.8	12.6	12.5	12.6	12.6	27.0	27.0	27.8	27.3	2.02	2.67	27.8	27.3	2.02	2.67	2.67	2.67
F	0.420	0.410				0.480		0.290	0.290	0.280	0.320	0.719	0.840	0.280	0.320	0.719	0.840	0.840	0.840
Cl	18.0	20.6	17.9	17.3	17.7	17.4	18.0	11.8	11.8	13.0	12.1	60.2	59.0	13.0	12.1	60.2	59.0	59.0	59.0
Br	0.064					0.060		0.043	0.043		0.041	0.174	0.216		0.041	0.174	0.216	0.216	0.216
SO <sub>4</sub>	63.4	61.8	60.7	59.4	60.3	60.0	60.3	89.0	89.0	92.6	91.4	232	199	92.6	91.4	232	199	199	199
Al	0.0180	0.0070				0.0110		0.0070	0.0070	0.0050	0.0038	0.8900	1.020	0.0070	0.0038	0.8900	1.020	1.020	1.020
Cr	<0.0001							0.0005	0.0005			0.0004		0.0005		0.0004			
Mn	0.0420	0.0260				0.0255		0.0003	0.0003	0.0016	0.0002	0.0049	0.0057	0.0003	0.0002	0.0049	0.0057	0.0057	0.0057
Fe	0.0115	0.0012				0.0047		0.0027	0.0027	0.0003	0.0015	0.0324		0.0027	0.0015	0.0324			
Cu	0.0001							0.0006	0.0006			0.0019		0.0006		0.0019			
Zn	0.0001							0.0008	0.0008			0.0040		0.0008		0.0040			
As	<0.0001							0.0001	0.0001			0.2290		0.0001		0.2290			
Hg																			
Pb	<0.0002							<0.0002	<0.0002			0.0002		<0.0002		0.0002			
δD (‰ SMOW)	-90.9	-93.0				-93.5		-87.8	-87.8	-88.9	-86.5	-85.2	-88.0	-88.9	-86.5	-85.2	-88.0	-88.0	-88.0
δ <sup>18</sup> O (‰ SMOW)	-11.58	-11.59	-11.67	-11.62	-11.62	-11.61		-11.99	-11.99	-11.96	-12.00	-5.97	-6.24	-11.96	-12.00	-5.97	-6.24	-6.24	-6.24

Tafla 5. (frh.)

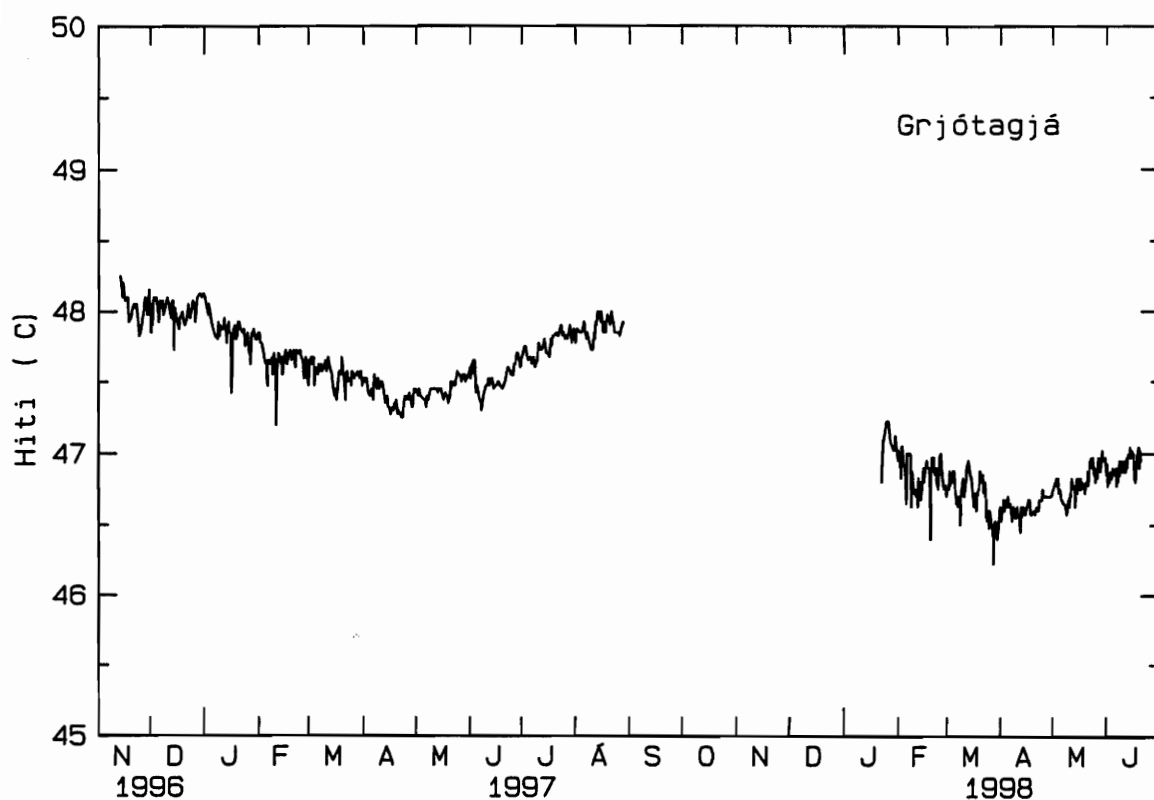
Staður nr.	17	17	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	19	20	21	22	
Taka nr.	1	6	1	2	3	4	5	6	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Sýni nr.	454	334	455	701	16	256	295	339	461	354	342	340	341	341	341	341	341	342	340	341	
Hiti (°C)	27.2	26.8	20.3	20.0	19.8	19.6	19.5	19.7	19.7	5.8	6.7	5.3	5.9	5.9	5.9	5.9	5.8	6.7	5.3	5.9	
pH/°C	8.22/24	8.32/19	8.09/24	8.38/22	8.48/22	8.42/123	8.43/23	8.36/24	8.07/22	8.52/24	9.02/26	9.14/25	8.82/25	8.82/25	8.82/25	8.82/25	8.52/24	9.02/26	9.14/25	8.82/25	
CO <sub>2</sub>	110.8	108.5	75.5	72.1	71.0	71.4	71.7	73.4	80.9	71.4	49.2	46.3	57.4	57.4	57.4	71.4	49.2	46.3	46.3	57.4	
H <sub>2</sub> S		<0.03		<0.03	<0.03		<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03	
B	0.16	0.26	0.14					0.12								0.07	0	0	0.08	<0.03	
Leiðni (µS/sm)/25°C	461	464	339	330	327	319	315	342	369	225	182	132	165	165	165	225	182	182	132	165	
SiO <sub>2</sub>	80.5	78.6	63.8	61.9	60.7	60.4	61.1	62.3	68.0	23.3	21.1	18.3	18.4	18.4	18.4	23.3	21.1	21.1	18.3	18.4	
Uppl. steinefni	246	316	265																		
Li	0.0099	0.0104	0.0070					0.0074								0.0029	0.0016	0.0016	0.0010	0.0027	
Na	59.4	61.2	46.8	47.0	45.3	47.3	48.4	46.9	52.4	21.5	22.7	17.8	18.6	18.6	18.6	21.5	22.7	22.7	17.8	18.6	
K	5.23	5.39	3.91	3.76	3.86	3.72	3.82	3.85	4.21	1.85	1.38	0.93	1.38	1.38	1.38	1.85	1.38	1.38	0.93	1.38	
Mg	5.49	5.19	3.47	3.47	3.61	3.43	3.53	3.34	3.34	6.80	3.46	2.04	4.48	4.48	4.48	6.80	3.46	3.46	2.04	4.48	
Ca	25.7	26.4	75.9	15.0	16.1	14.8	15.0	15.4	16.2	12.1	7.46	5.29	7.36	7.36	7.36	12.1	7.46	7.46	5.29	7.36	
F	0.290	0.420	0.286					0.270								0.230	0.270	0.270	0.180	0.200	
Cl	11.5	11.0	11.0	9.37	10.2	9.82	10.1	10.2	10.7	4.39	3.10	2.13	2.20	2.20	2.20	4.39	3.10	3.10	2.13	2.20	
Br	0.044	0.036	0.032					0.036								0.015	0.011	0.011	0.007	0.007	
SO <sub>4</sub>	81.8	82.6	56.3	52.1	54.8	52.3	54.4	55.1		22.1	19.0				22.1	19.0	19.0			0.007	
Al	0.0050	0.0055	0.0120	0.0060				0.0087								0.0058	0.0105	0.0105	0.0144	0.0131	
Cr	0.0004		0.0003																		
Mn	0.0003	<0.0001	0.0004	0.0029				<0.0001		0.0001	<0.0001	0.0002	<0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0001	<0.0001	<0.0001	0.0002	<0.0001	
Fe	0.0036	0.0048	0.0017	0.0008				0.0011		0.0015	0.0024	0.0015	0.0012	0.0012	0.0012	0.0015	0.0024	0.0024	0.0015	0.0012	
Cu	0.0008		0.0016																		
Zn	0.0006		0.0003																		
As	0.0001		0.0002																		
Hg																					
Pb	<0.0002		<0.0002																		<0.00005
δD (‰ SMOW)	-88.1	-87.7	-90.2	-91.5	-12.46	-12.51	-12.42	-12.45	-12.46	-94.4	-92.6	-93.4	-94.8	-94.8	-94.8	-94.4	-92.6	-92.6	-93.4	-94.8	
δ <sup>18</sup> O (‰ SMOW)	-12.07	-12.06	-12.37	-12.45	-12.46	-12.51	-12.42	-12.45	-12.46	-12.72	-12.87	-12.87	-13.03	-13.03	-13.03	-12.72	-12.87	-12.87	-12.87	-13.03	

Fyrri athuganir á samsætum (Friedman o.fl. 1963, Bragi Árnason 1976) og á hitastigi í lindum og gjám í Mývatnssveit benda til þess að árstíðabundnar sveiflur séu í uppruna vatnsins. Til þess að ganga nánar úr skugga um þetta hafa verið settir síritandi hitamælur í Stórugjá og Grjótagjá. Náðst hafa sam-felldar raðir mælinga frá nóvember 1996 til júní 1998 og eru niðurstöður þeirra sýndar á myndum 8 og 9. Vegna bilana í búnaði varð hlé á mælingum frá ágústlokum 1997 fram í nóvember í Stórugjá en fram í janúar 1998 í Grjótagjá. Ekki er víst að hitafall það sem fram kemur er mælingar hófust að nýju sé raunverulegt heldur getur verið um stillingar óvissu að ræða. Þar kemur fram að hitastig sveiflast um 2°C (frá 46.2 að 48.2) á þessu tímabili en um 1°C (frá 28.8 að 29.8°C) í Stórugjá sé gert ráð fyrir að hitafallið sé raunverulegt en um 1°C í Grjótagjá og 0.7°C í Stórugjá sé það ekki raunverulegt. Í báðum gjám er hiti lægstur í mars apríl, en hann er hæstur í ágúst í Stórugjá en hæstur í nóvember í Grjótagjá. Líklegast er um að ræða kælingu af völdum leysinga á vorin en hitnun vegna lítills rennslis að hausti

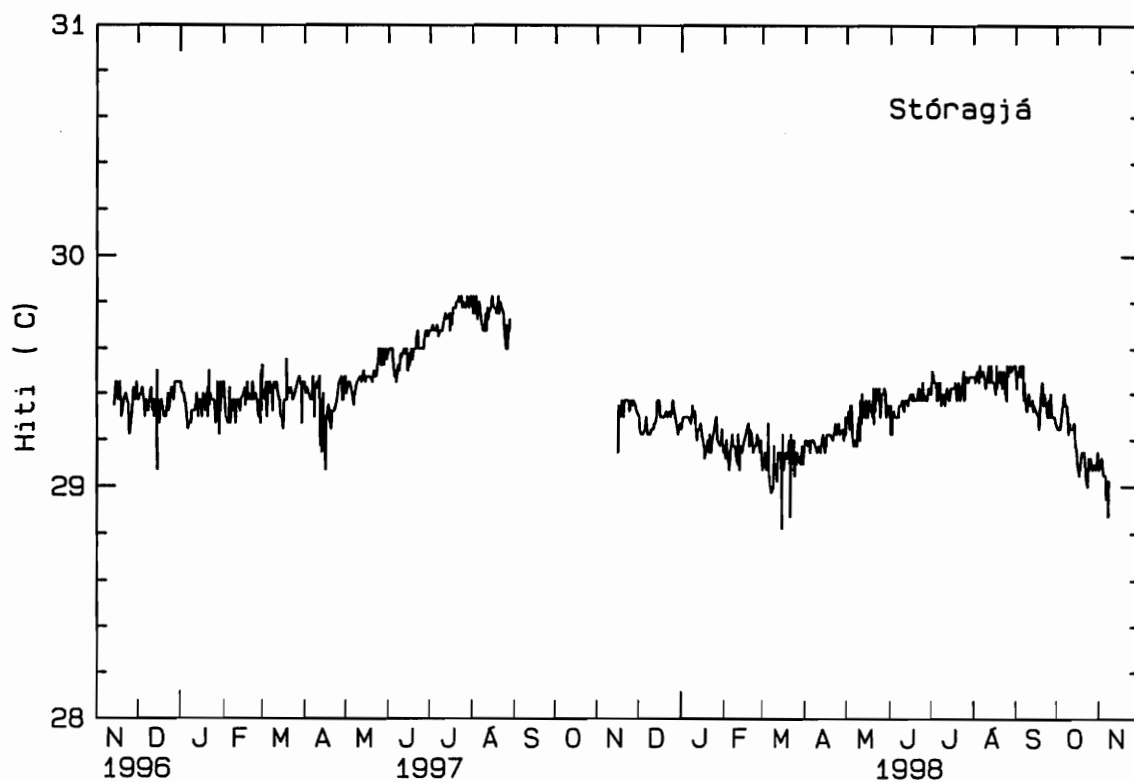
# Na/1000



Mynd 7. Na/1000-K/100- $\sqrt{Mg}$  línurit fyrir grunnvatn frá Kröflu og Námafjalli



Mynd 8. Hitastig í Grjótagjá nóvember 1996 – júní 1998



Mynd 9. Hitastig í Stórugjá nóvember 1996 – nóvember 1998

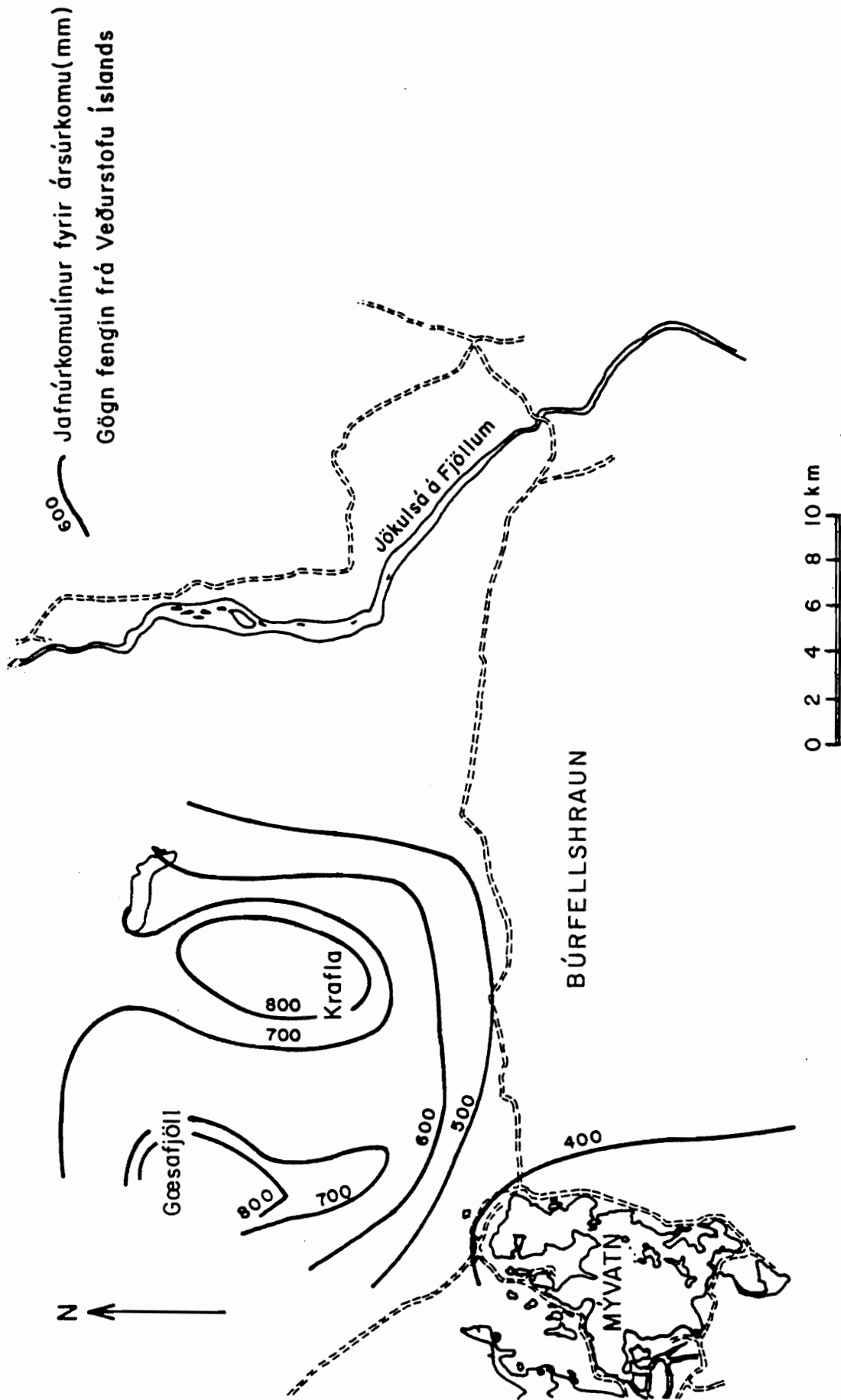
## 5. ÚRKOMA OG RENNSLISLEIÐIR GRUNNVATNS Á KRÖFLU- OG NÁMAFJALLSSVÆÐI

Gögn hafa fengist um úrkomu 1931 – 1960 (Adda Bára Sigfúsdóttir pers. uppl. 1975) og 1961-1990 (Þórunn Pálsdóttir pers. uppl. 1998) á öllum nálægum veðurathugunarstöðum. Næstu staðir eru Reykjahlíð og Grímsstaðir og út frá úrkomu þar 1931-1960 útbjó Veðurstofan úrkomukort fyrir Kröflu- og Námafjallssvæði (mynd 10). Lausleg athugun á gögnum frá 1961-1990 bendir ekki til mikilla breytinga og myndu þau leiða til áþekks korts ef sömu forsendur væru notaðar til reikninga.

Nokkrar tilraunir hafa verið gerðar til að meta grunnvatnsstreymi frá Kröflu til Mývatns (Guttormur Sigbjarnarson o. fl. 1974, Stefán Arnórsson og Einar Gunnlaugsson 1976, Jón Ingimarsson o.fl. 1976, Björn Jóhannesson 1977, 1980) en yfirgripsmest er kort Freys Þórarinssonar og Báru Björgvinsdóttur (1980). Um Námafjallssvæðið sérstaklega hefur og verið fjallað (Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson 1983, Eric de Zeeuw og Gestur Gíslason 1988). Að auki hefur Kristján Sæmundsson (pers. uppl.) mælt vatnsborð þar sem unnt er bæði á Námafjalls- og Kröflusvæðum. Ennfremur hafa samsæturannsóknir (Friedman o. fl. 1963, Bragi Árnason 1976, Darling and Ármannsson 1989) gefið nokkra hugmynd um uppruna og rennsli. Ofangreindum upplýsingum hefur verið safnað saman og gert eitt vatnshæðarkort af svæðinu frá Kröflu að Mývatni (mynd 11). Bendir það til að rennsli gæti verið frá Kröflu í átt til Mývatns en að það virðist hins vegar geta farið langt suður áður en það blandast vatni sem kemur sunnan að og rennur til Mývatns. Vatn frá Námafjalli rennur hins vegar beint til Mývatns. Reynt hefur verið að taka tillit til þess að mælingar eru gerðar á mismunandi tímum og hafa verður í huga að vatnsborðssveiflur geta verið töluverðar. Á vinnslusvæðum jarðhita eru slíkar breytingar háðar vinnslu og hafa töluverð áhrif á streymi a.m.k. innan Kröfluöskjunnar. Á mynd 12 er sýnd árssveifla vatnsborðs í nokkrum holum sem ekki voru nýttar á þeim tíma og er hún mjög mismunandi. Mest var sveiflan í holu KJ-6 en yfirlit um vatnsborðsmælingar í henni 1976 – 1992 er sýnt á mynd 13. Mætti túlka það sem hækkun vatnsborðs þar en athugun á mynd 10 bendir til þess að slík túlkun sé varhugaverð. Þrátt fyrir slíka óvissu virðist einsýnt að vatn streymir frá Kröflu og suður. Halldór Ármannsson (1995) hefur fjallað um holu AB-02 í Búrfellshrauni sem boruð var til þess að fylgjast með rennsli affallsvatns frá Kröflu. Ekki hefur orðið vart áhrifa þess þar en vatnsborðsmælingar benda til þess að nokkur sveifla sé í grunnvatnsborði á þessum slóðum (mynd 14). Lindir suðvestan Mývatns voru ekki hafðar með á kortinu en athuganir benda til þess að þar streymi vatn sunnan frá (Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson 1983, Friedman o. fl. 1963, Bragi Árnason 1976).

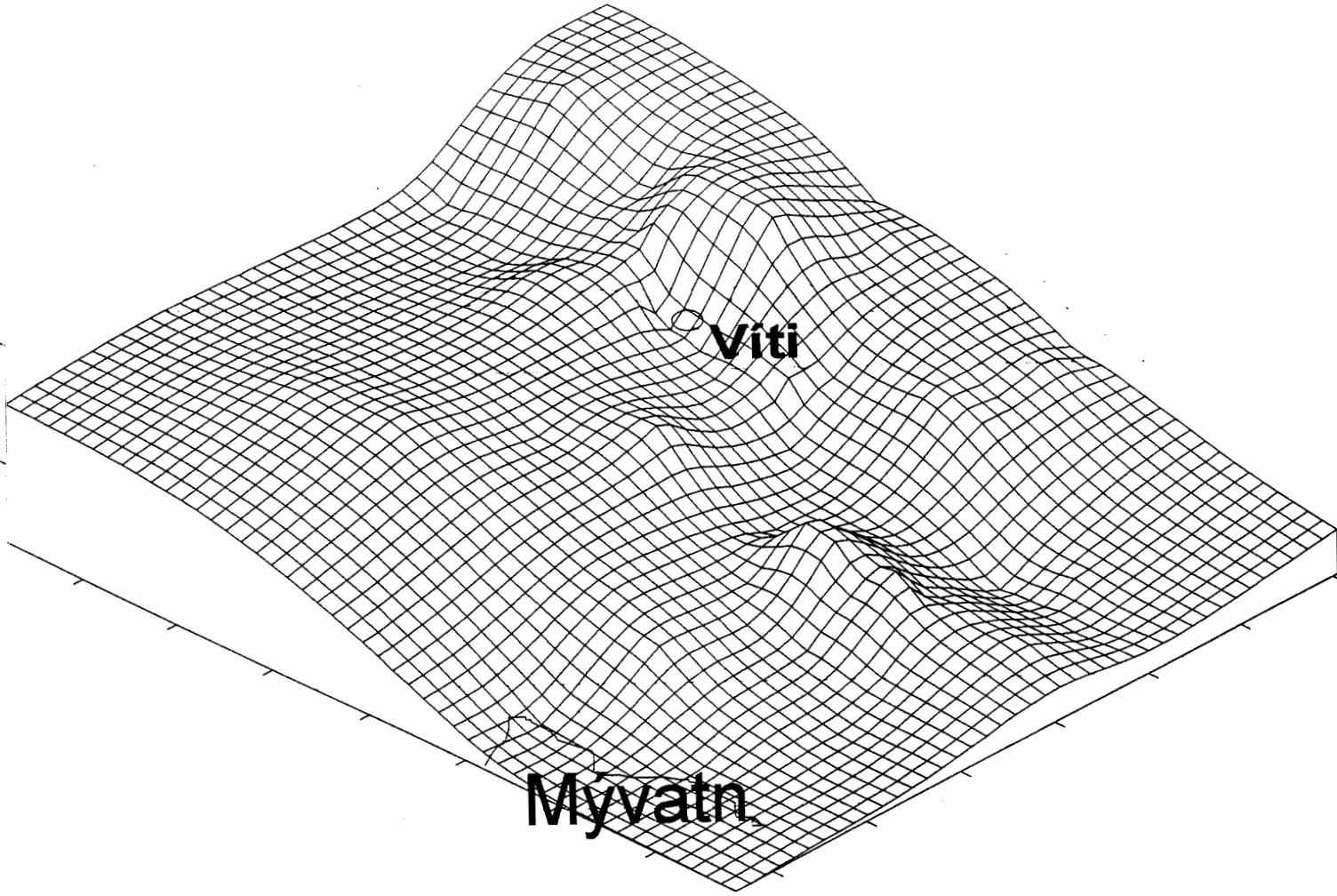
## 6. UPPTAKA EFNA Í GRUNNVATN

Til þess að kanna hugsanlega upptöku efna í staðbundið grunnvatn við jarðhitaadstæður og blöndun þess síðar við eldfjallagas hafa verið gerðir frumreikningar þar sem basalt (Jan Swanteson og Hrefna Kristmannsdóttir 1978) er títrað með vatni með samsetningu vatns úr Austaraselslindum (Guðrún Sverrisdóttir 1991) við 205°C sem er algengt hitastig í efrakerfinu í Kröflu. Loks hefur eldfjallagasi með þá samsetningu sem mæld og reiknuð var fyrir gas sem safnað var í Surtsey (Sigvaldason and Elísson 1968, Gerlach 1980) verið bætt við í þrepum og kannað hvaða áhrif það

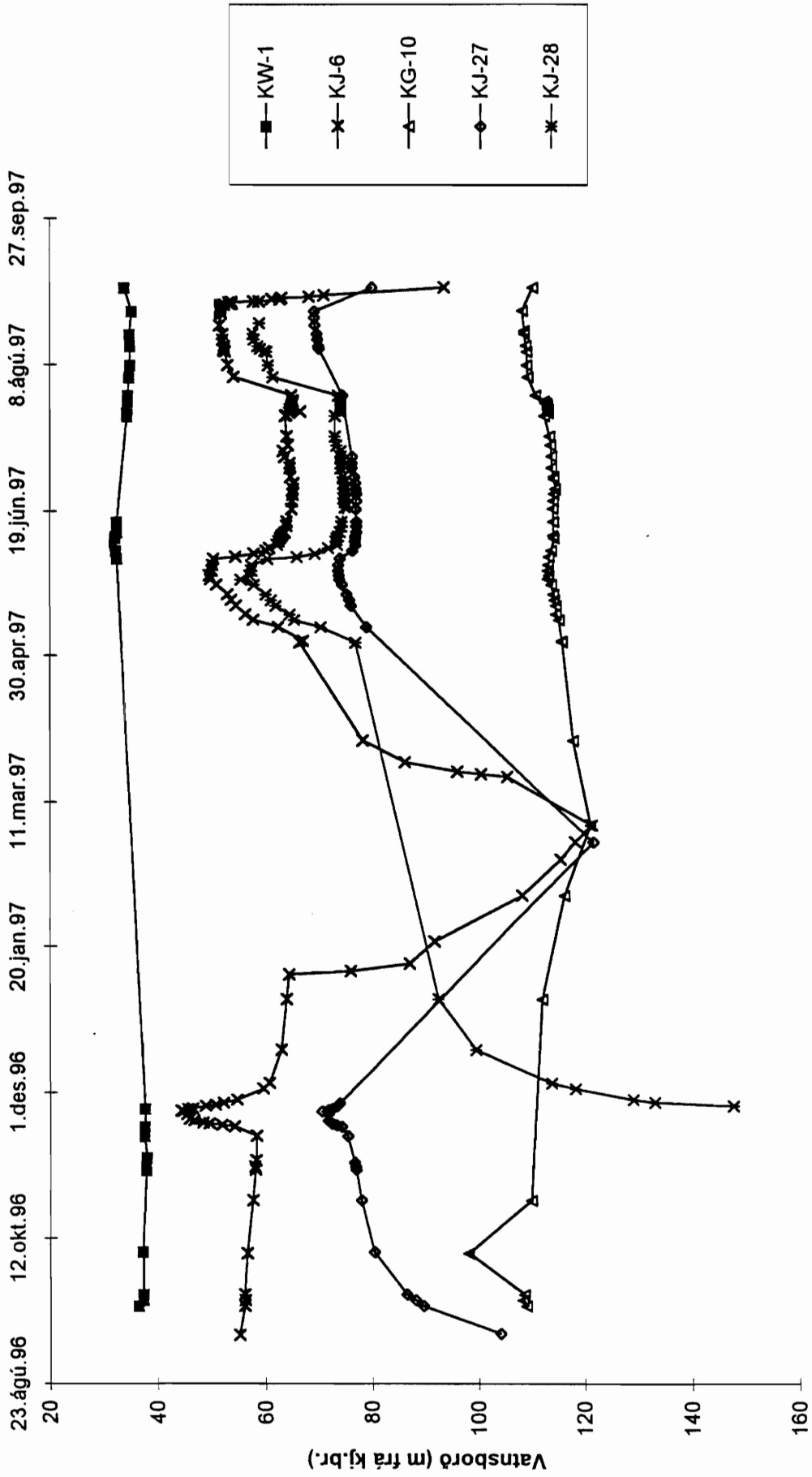


Mynd 10. Árleg úrkomu á Króflu – Námafjallssvæði 1931 – 1960 miðuð við mælingar í Reykjahlöð og á Grímsstöðum á Fjöllum

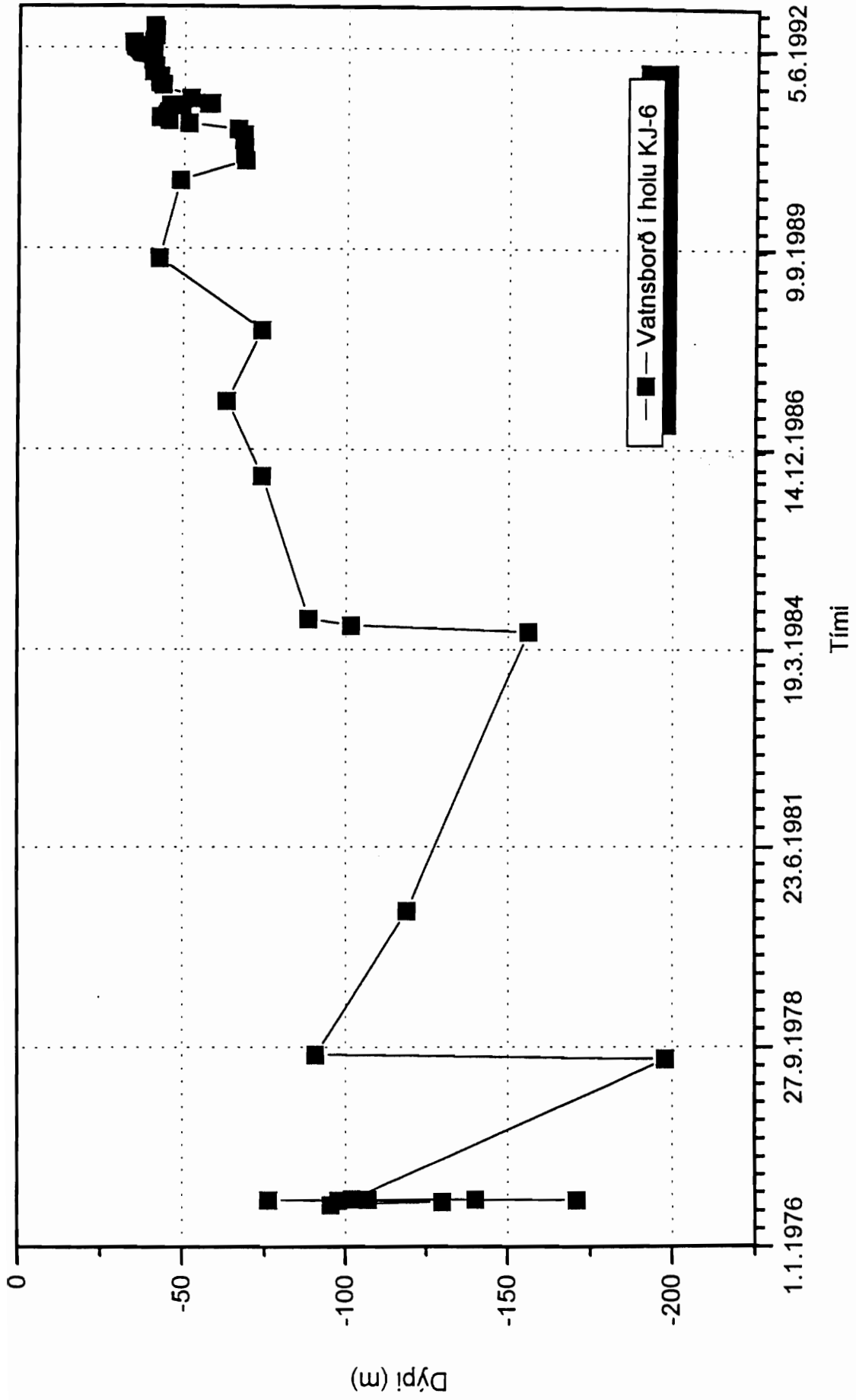




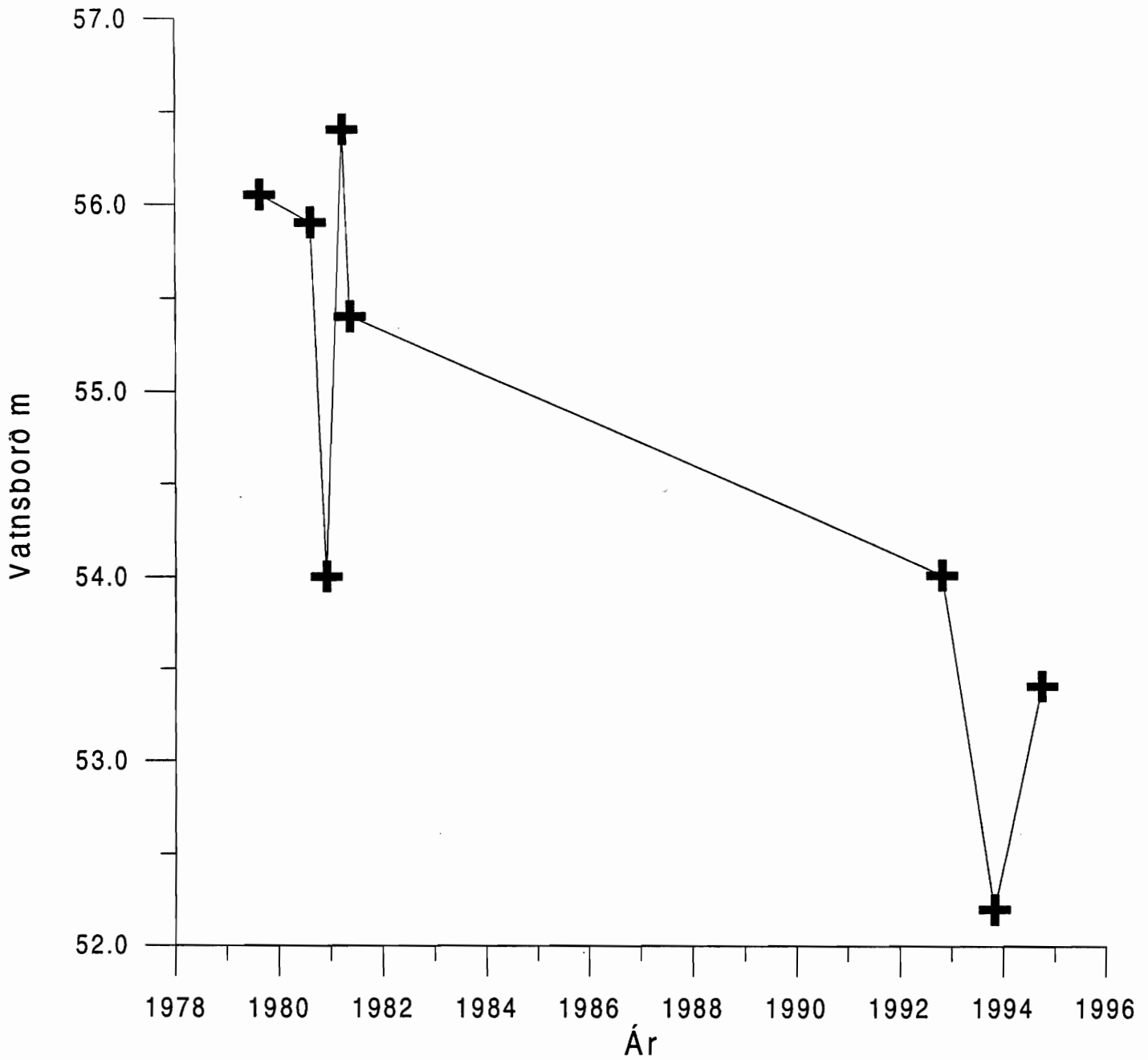
Mynd 11. Grunnvatnshæð á Kröflu-Námafjallssvæði



Mynd 12. Vatnsborð í nokkrum Kröfluhólum ágúst 1996 – september 1997



Mynd 13. Krafla KJ-6. Vatnsborð 1976 - 1992



Mynd 14. Hola AB-02, Búrfellshrauni. Vatnsborð 1979-1998

hefði á efnasamsetningu vökvans. Sú efnasamsetning sem byrjað er með er sýnd í töflum 6-8.

Tafla 6. Efnasamsetning basalts á Kröflusvæði (%). Stílfært meðaltal með ofgnótt  $K_2O$

$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$FeO$	$MnO$	$MgO$	$CaO$	$Na_2O$	$K_2O$	$H_2O$
50.0	13.7	5.0	7.0	0.1	6.0	10.0	3.0	5.0	3.0

Tafla 7. Efnasamsetning vatns úr Austaraselslindum notað til títrunar (mg/kg)

pH/°C	SiO <sub>2</sub>	Na	K	Ca	Mg	CO <sub>2</sub>	SO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S	Cl	F	U.e. <sup>1)</sup>
7.6/23	26.4	7.8	1.1	8.7	5.0	40.0	5.7	0.00	2.9	0.05	164

<sup>1)</sup> U.e.: Uppleyst efni

Tafla 8. Samsetning eldfjallagass frá Surtsey (frá því snemma í gosi, mól %)

CO	CO <sub>2</sub>	HCl	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> S	SO <sub>2</sub>	S <sub>2</sub>
0.70	9.54	0.81	2.78	81.56	0.76	3.64	0.19

Útkomur útreikninga fyrir nokkur skilyrði eru rakin í töflu 9.

Tafla 9. Reiknuð efnasamsetning lindarvatns (ppm) eftir snertingu við berg og blöndun við eldfjallagas við 205°C

V/B:gas-hluti <sup>1)</sup>	1000:0	40:0	10:0	1:0	1:0.001	1:0.01	1:0.1	1:0.1+H <sub>2</sub> <sup>2)</sup>	1:1+H <sub>2</sub>
Cl <sup>-</sup>	2.9	2.9	2.9	2.9	14.9	134	1118	1194	6545
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.5	0	0	0	0	0	125	30.9	496
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	55.4	55.4	55.4	55.7	221	1861	1614	1234	227
HS <sup>-</sup>	1.5	7.5	35.9	97.9	246	1673	73.4	68.4	1.21
SiO <sub>2</sub>	190	243	369	722	713	669	204	190	237
Al <sup>+3</sup>	0.75	4.9	4.8	5.7	5.7	4.2	0.66	0.73	0.05
Ca <sup>+2</sup>	0.035	0.0048	0.0030	0.0036	0.0037	0.0035	0.064	0.074	104
Mg <sup>+2</sup>	2.5*10 <sup>-5</sup>	4.0*10 <sup>-6</sup>	3.0*10 <sup>-6</sup>	2.5*10 <sup>-6</sup>	2.5*10 <sup>-5</sup>	3.1*10 <sup>-5</sup>	8.1*10 <sup>-5</sup>	3.0*10 <sup>-5</sup>	0.03
Fe <sup>+2</sup>	0.00012	0.00011	0.00013	0.00023	0.00023	0.00023	0.00018	0.00015	0.0018
K <sup>+</sup>	25.8	15.3	54.8	316	321	341	111	95.0	327
Mn <sup>+2</sup>	3.4*10 <sup>-4</sup>	6.0*10 <sup>-5</sup>	1.5*10 <sup>-5</sup>	8.4*10 <sup>-5</sup>	8.5*10 <sup>-5</sup>	9.5*10 <sup>-5</sup>	0.0018	0.0018	1.34
Na <sup>+</sup>	26.8	171	422	1424	1449	1703	1446	1246	4197
F <sup>-</sup>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.03

1) V/B = vatns-berghlutfall. 2) +H<sub>2</sub> : vetni hvarfast

Til samanburðar er sýnd samsetning djúpvatns frá völdum holum í Kröflu og Námafjalli í töflu 10. Athuga ber að engin klórgreining var gefin upp fyrir berg og engin flúorgreining fyrir berg og gas og bera tölurnar merki þess. Greinilegt er að V/R = 1 er of lágt en V/R=10 nær lagi. Þá virðist eins og gashluti milli 0.001 og 0.01 ætti að duga til að fá skynsamlegar tölur. Styrkur Mg<sup>+2</sup> og Fe<sup>+2</sup> reiknast yfirleitt mjög lítill en Al<sup>+3</sup> heldur mikill. Helst virðist sem hvarf við H<sub>2</sub> breyti því en við það virðist klóríð aukast mjög. Greinilegt er að reikna þarf áhrif gasviðbótar við V/R = 10-40 og kanna áhrif efnahvarfs við H<sub>2</sub> við þær aðstæður. Ekki er víst að ofgnótt sú fyrir K sem gefin er upp hafi áhrif á efnasamsetningu vatnsins þar sem jafnvægi er sennilega náð og eftir situr ofgnótt K í berginu..

Tafla 10. Efnasamsetning djúpvatns í völdum holum í Kröflu og Námafjalli. Stuðst er við efnagreiningar á gufu og vatni, aflmælingar og reikninga með forritinu WATCH (Stefán Arnórsson o. fl. 1982, Jón Örn Bjarnason 1994)

Svæði	Krafla	Krafla	Krafla	Krafla	Námafjall	Námafjall
Undir-svæði	Leir-botnar	Leir-botnar	Suður-hlíðar	Hvíthólar	Bjarnarflag	Bjarnarflag
Staður	Efrihluti	Neðrihluti			Vestan Krummagjár	Austan Krummagjár
Hola nr.	KG-8	KJ-13 <sup>1)</sup>	KJ-14	KJ-21 <sup>1)</sup>	B-04	BJ-11
Dags.	77.03.22	83.10.29	80.09.20	83.11.01	73.05.13	92.05.01
Hiti °C <sup>2)</sup>	224	310	295	267	250	248
Cl <sup>-</sup>	25.14	27.37	45.82	137.22	7.19	30.8
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	185.17	134.69	62.27	20.22	58.2	18.6
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	383.26	548.96	8011.66	213.25	145.57	25.23
HS <sup>-</sup>	62.68	847.22	313.98	67.41	148.5	141.71
SiO <sub>2</sub>	366.13	645.62	644.68	569.81	552	484
Al <sup>+3 3)</sup>	1.15	0.46	0.038	0.96		0.38
Ca <sup>+2</sup>	1.36	3.16	0.81	0.85	1.18	0.56
Mg <sup>+2</sup>	0.025	0.005	0.047	0.005	0.034	0.009
Fe <sup>+2 3)</sup>	0.024		0.046		0.008	
K <sup>+</sup>	19.11	26.42	39.75	28.03	21.1	14.2
Na <sup>+</sup>	184.41	165.42	170.16	151.27	135.0	91.1
F	0.91	0.89	0.84	0.55	1.52	0.66

<sup>1)</sup> Í þessum tilvikum reiknuðust holur KJ-13 og KJ-21 í suðu, og í djúpgufu KJ-13 reiknuðust 11926.6 mg/kg CO<sub>2</sub>, 872.9 mg /kg H<sub>2</sub>S og gufuhluti 0.24, en í KJ-21 10104.0 mg/kg CO<sub>2</sub>, 1077.7 mg/kg H<sub>2</sub>S og gufuhluti 0.10. <sup>2)</sup> Viðmiðunarhiti; ýmist kvarshiti eða hiti valinn með hliðsjón af mælingum. <sup>3)</sup> Al og Fe mælingar voru ekki til fyrir hin völdu sýni en meðaltöl styrks þessara efna í þeim tilvikum þar sem gildi fyrir þessa málma voru til látin ráða.

## 7. HELSTU NIÐURSTÖÐUR

Grunnvatni á Mývatnssvæði hefur verið skipt í fimm flokka eftir efna- og samsættusamsetningu. Sennilega er um þrennan uppruna kalds grunnvatns að ræða, þ.e. vatn runnið frá Kröflu og nágrenni, vatn frá Dalfjalls-, Hlíðarfjallssvæði og vatn komið langt sunnan að. Alls staðar gætur jarðhitaáhrifa en mismikið. Í sumum tilvikum er um að ræða kólnandi jarðhitavatn en í öðrum blöndu jarðhitaaffalls og kalds grunnvatns. Ekki hefur tekist að sýna fram á rennsli affalls frá Kröfluvirkjun beint til Mývatns.

Frumkönnun á því hvort unnt er að rekja breytingu grunnvatns í háhitavatn með því að athuga líkleg efnahvörf milli vatns og bergs ásamt hugsanlegri blöndun við kvikugas leiddi ekki til þess að nákvæm samsvörun fengist milli hinnar reiknuðu samsetningar og samsetningar vatns í Kröflu- og Námafjallskerfunum. Helstu ástæður voru að ekki hafði náðst í nægileg gögn um öll efni og reikningar voru gerðir fyrir fá mengi aðstæðna. Engu að síður benda reikningar til þess að þrengja megi val á aðstæðum þannig að töluverð nálgun verði, t.d. með því að bæta kvikugasi í við annað vatns/bergs

hlutfall en gert var í frumreikningunum. Einnig ætti að vera unnt að fá betri upplýsingar um styrk klórs og flúors í bergi og flúors í kvikugufu til þess að bæta grunnupplýsingar.

## 8. HEIMILDIR

Arnórsson, S 1995: Geothermal systems in Iceland: Structure and conceptual models – II. Low-temperature areas. *Geothermics*, 24: 603-629.

Arnórsson, S., Sigurdsson, S., and Svavarsson, H., 1982: The chemistry of geothermal waters in Iceland. I. Calculation of aqueous speciation from 0° to 370°C. *Geochim. Cosmochim. Acta* 46, 1513-1532.

Ármannsson, H., Benjamínsson, J. og Jeffrey, A.W.A. 1989: gas changes in the Krafla geothermal system, Iceland. *Chem. Geol.*, 76: 175-196.

Ármannsson, H., Gíslason, G. og Hauksson, T 1982: Magmatic gases in well fluids aid the mapping of the flow pattern in a geothermal system. *Geochim. cosmochim. Acta*, 46: 167-177.

Ármannsson, H., Guðmundsson, Á og Steingrímsson, B.S. 1987: Exploration and development of the Krafla geothermal area. *Jökull*, 37: 31-49

Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Sæþór L. Jónsson og Sverrir Þórhallsson 1989: borholur í Bjarnarflagi. Orkustofnun OS-89046/JHD-21 B, 87 s.

Björn Jóhannesson 1977: Um grunnvatnsstrauma á landræmu frá Dyngjufjöllum og norður í Óxarfjörð. *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 bls.

Craig, H. 1961: Isotope variations in meteoric waters. *Science*, 133: 1702-1703.

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.

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 bls.

Friedman, I., Sigurgeirsson, Th. and Garðarsson, Ö. 1963. Deuterium in Iceland waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 27, 553-561.

Freyr Þórarinsson og Bára Björgvinsdóttir 1980: Krafla – Námafjall: Grunnvatnshæð. *Orkustofnun*, FÞ-BB-80/01, 3 s.

Gerlach, T.M. 1980: Evaluation of volcanic gas analyses from Surtsey volcano, Iceland, 1964-1967. *J. Volc. Geoth. Res.*, 8: 191-198.

Giggenbach, W.F. 1988: Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg geothermometers. *Geochim. cosmochim. Acta*, 52: 2749-2765.

Giggenbach, W.F. 1991: Chemical techniques in geothermal mineral exploration. In *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development* (Ritstjóri: F. D'Amore). UNITAR/UNDP Centre on Small Energy Resources, Rome: 119-144.

Guðrún Sverrisdóttir 1991: Efnasamsetning neysluvatns á Íslandi. Orkustofnun, GSV-91/05: 3 s.

Guttormur Sigbjarnarson, Haukur Tómasson, Jónas Elíasson og Stefán Arnórsson 1974. Álitserð um mengunarhættu vegna affallsvatns frá gufuvirkjun við Kröflu eða Hverarönd. Orkustofnun, OS JHD 7427, OS ROD 7421, 16 bls.

Halldór Ármannsson 1993: Jarðhitakerfið í Námafjalli. Efnifræðileg úttekt. Orkustofnun, OS-93053/JHD-29 B: 30 s.

Halldór Ármannsson 1995: Um affallsvatn frá kröfluvirkjun. Niðurstöður athugana á holu AB-02, Búrfellshrauni. Orkustofnun, OS-95046/JHD-30 B: 14 s.

Jan Swanteson og Hrefna Kristmannsdóttir 1978: Efnasamsetning ummyndaðs bergs í Kröflu. Orkustofnun, OSJHD-7822:

Jón Örn Bjarnason 1994: The speciation program WATCH, version 2.1. Orkustofnun, 7 s.

Jón Ingimarsson, Jónas Elíasson og Sven Þ. Sigurðsson 1976: Frárennsli Kröfluvirkjunar. Orkustofnun, OSSFS-7602: 30 s.

Ólafsson, M. og Kristmannsdóttir, H. 1989: The influence of volcanic activity on groundwater chemistry within the Námafjall geothermal system, north Iceland. In *Water-Rock Interaction* (Ritstjóri: D.L. Miles). Balkema, Rotterdam: 537-540.

Ómar Sigurðsson 1993: Jarðhitakerfið í Bjarnarlagi. Mat á hita, þrýstingi og afköstum. Orkustofnun, OS-93016/JHD-08 B, 45 s.

Sigvaldason, G.E. og Elísson, G. 1968: Collection and analysis of volcanic gases at Surtsey, Iceland. *Geochim. cosmochim. Acta*, 32: 797-805.

Stefán Arnórsson og Einar Gunnlaugsson 1976. Vatnasvið Hlíðardalslækjar og affallsvatn frá Kröfluvirkjun. Orkustofnun, OS JHD 7602, 13 bls.

Sveinbjörnsdóttir, Á.E., Johnsen, S. og Arnórsson, S. 1995: The use of stable isotopes of oxygen and hydrogen in geothermal studies in Iceland. *Proc. World geothermal Congress* (Ritstjórar: Barbier, E., Frye, G. Iglesias, E. og Pálmason, G.), 1043-1048.



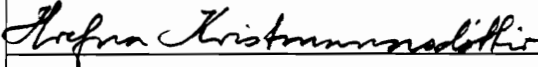
Tole, M.P., Ármannsson, H., Pang Zhong-He og Arnórsson, S. 1993: Fluid/mineral equilibrium calculations for geothermal fluids and chemical geothermometry. *Geothermics*, 22: 17-37.

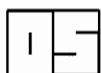
Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson 1997: Krafla og Bjarnarflag. Afköst borhola og efnainnihald vatns og gufu í borholum og vinnslurás í júlí 1997. Landsvirkjun, Kröflustöð, 70 bls.

Truesdell, A.H., Haizlip, J.R., Ármannsson, H. og D'Amore, F. 1989: Origin and transport of chloride in superheated geothermal steam. *Geothermics*, 18: 295-304.

Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson 1983. Kísiliðjan við Mývatn. Grunnvatnsrannsóknir. Orkustofnun, OS83118/VOD-10, 42 bls.



<b>Skýrsla nr:</b> OS-OS-99028	<b>Dags:</b> Apríl 1999	<b>Dreifing:</b> <input checked="" type="checkbox"/> Opín <input type="checkbox"/> Lokuð til
<b>Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill:</b> FERILPRÓFUN Á MÝVATNSSVÆÐINU	<b>Upplag:</b> 40	
	<b>Fjöldi síðna:</b> 48	
<b>Höfundar:</b> Hrefna Kristmannsdóttir, Steinunn Hauksdóttir Guðni Axelsson, Magnús Ólafsson, Halldór Ármannsson	<b>Verkefnisstjóri:</b> Hrefna Kristmannsdóttir	
<b>Gerð skýrslu / Verkstig:</b> Grunnvatnsrannsókn, ferilprófun	<b>Verknúmer:</b> 8-760133	
<b>Unnið fyrir:</b> Landsvirkjun		
<b>Samvinnuaðilar:</b>		
<b>Útdráttur:</b> Í skýrslunni er gerð grein fyrir framkvæmd og niðurstöðum ferilprófana á Kröflu- og Námafjalls- svæðum sumarið 1998 og samanburði við ferilprófanir frá 1981-1982. Megintilgangur verksins var að fá sem gleggsta mynd af rennislíleiðum affallsvatns frá virkjunum á þessum svæðum, ekki síst m.t.t. þess hversu lengi affallsvatn er á leiðinni til Mývatns og styrks hugsanlegra spilliefna. Gerðar voru fjórar prófanir, þrjár með niðursetningu ferilefna í affallssveig frá lóninu í Bjarnarflagi og ein í affallssveig Hlíðardalslækjar í Búrfellshrauni. Notuð voru ferilefnin rhódamín WT, Na-flúoreschein og kalíumjodíð. Gögn frá mælingunum 1998, bæði um endurheimtu ferilefna og grunnvatnsrennsli, eru of takmörkuð til að hægt sé að túlka þau af nokkurri nákvæmni. Niðurstöðurnar sýna þó að ferilefnið dreifist mjög vel um allt grunnvatnskerfið, og hið sama gildir væntanlega um affalls- vatn frá virkjun í Bjarnarflagi. Mörgum atriðum er ósvarað varðandi rennislíleið jarðhitaaffalls til Mývatns og rennislíferli grunnvatns frá Bjarnarflagi. Prófanirnar gáfu engar mælanlegar niður- stöður um rennsli affallsvatns frá Kröflu. Settar eru fram tillögur um þær viðbótarrannsóknir sem taldar eru nauðsynlegar varðandi þessi atriði.		
<b>Lykilorð:</b> Mývatn, grunnvatnsrennsli, ferilefni, flúoreschein, rhódamín, jodíð, ferilprófanir, sýnataka	<b>ISBN-númer:</b> 9979-68-034-2	
	<b>Undirskrift verkefnisstjóra:</b> 	
	<b>Yfirfarið af:</b> HK	



**ORKUSTOFNUN**  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 8-760133

**Hrefna Kristmannsdóttir**  
**Steinunn Hauksdóttir**  
**Guðni Axelsson**  
**Magnús Ólafsson**  
**Halldór Ármannsson**

## **Ferilprófun á Mývatnssvæðinu**

**Unnið fyrir Landsvirkjun**

**OS-99028**

**Apríl 1999**

ISBN 9979-68-034-2

ORKUSTOFNUN: Kennitala 500269-5379 - Sími 569 6000 - Fax 568 8896  
Netfang os@os.is - Heimasíða <http://www.os.is>

## Efnisyfirlit

1. Inngangur	5
2. Fyrri ferilprófanir	6
3. Val á ferilefni í tilraun 1998	8
4. Fyrsta ferilprófun 1998 með flúoresceini og rhódamíni	9
4.1 Niðursetning	9
4.2 Sýnataka	9
4.3 Mælingar	9
4.4 Samanburðarmælingar á rhódamín WT og Na-flúoreschein með Turner 111 fluoromæli	11
4.5 Helstu niðurstöður	13
5. Önnur ferilprófun með kalíumjodíði	21
5.1 Val á ferilefni, magn og bakgrunnur	21
5.2 Niðursetning og sýnataka	21
5.3 Mælingar	22
5.4 Helstu niðurstöður	22
6. Lokaáfangi prófana í nóvember 1998 með flúoresceini	27
6.1 Efnisval og niðursetning	27
6.2 Sýnataka	27
6.3 Mælingar og helstu niðurstöður	28
7. Túlkun á endurheimtu jodíðs	30
8. Túlkun niðurstaðna	39
9. Meginniðurstöður	42
10. Tillögur	43
11. Heimildir	44
Viðauki: Sýnatöku- og niðursetningarstaðir í Mývatnssveit	47

## MYNDIR

Mynd 1. Staðir þar sem tekin hafa verið sýni til rannsókna á efnasamsetningu grunnvatns	7
Mynd 2. Vesturjaðar affallslónsins í Bjarnarflagi og afrennislækur þess	14
Mynd 3. Nærmynd af svelgnum í affallslæk Bjarnarflagslónsins	14
Mynd 4. Niðurstöður mælinga á flúoresceini á rannsóknarstofu í Kröflu sem fall af tíma fyrir hvern sýnatökustað	15-16
Mynd 5. Niðurstöður mælinga á rhódamíni á rannsóknarstofu í Kröflu sem fall af tíma fyrir hvern sýnatökustað	17-18
Mynd 6. Mælingar Orkustofnunar á styrk beggja efnanna, flúoresceins og rhódamíns, sem fall af tíma fyrir hvern sýnatökustað	19-20
Mynd 7. Mælingar á kalíumjoðíði með tíma á sýnatökustöðum	24-25
Mynd 8. Mælingar á kalíumjoðíði í Grjótagjá fram í janúar 1999	26
Mynd 9. Niðurstöður mælinga á flúoresceini á sýnatökustöðunum sex á móti tíma frá niðursetningu	29
Mynd 10. Leiðréttar mælingar á kalíumjoðíði á öllum sýnatökustöðunum	33-35
Mynd 11. Leiðréttar mælingar á kalíumjoðíði í Grjótagjá fram í janúar 1999	35
Mynd 12. Meðalgildi endurheimtu e/q fyrir alla sýnatökustaðina	35-37
Mynd 13. Samband milli hita grunnvatnsstreymis og fjarlægðar frá Bjarnarflagi	38
Mynd 14. Hraði grunnvatnsstreymisins sem fall af fjarlægð frá frá Bjarnarflagi	38
Mynd 15. Samband hitastigs grunnvatns á móti hraða grunnvatnsstreymis	38

## TÖFLUR:

Tafla 1. Staðir þar sem tekin hafa verið sýni á Mývatnssvæðinu til rannsókna á grunnvatni	10
Tafla 2. Greiningar á Na- flúoresceini úr sýnum á Mývatnssvæði	12
Tafla 3. Greiningar á rhódamíni úr sýnum á Mývatnssvæði	12
Tafla 4. Samanburðarmælingar á flúoresceini og rhódamíni	13
Tafla 5. Niðurstöður mælinga á kalíumjoðíði úr sýnum á Mývatnssvæði	23
Tafla 6. Sýnatökustaðir í lokaáfangi ferilprófunar í desember 1998-janúar 1999	28
Tafla 7. Niðurstöður túlkunar endurheimtu joðíðs	31
Tafla 8. Áætlanir um endurheimtu joðíðs í Mývatni á prófunartímanum	32

## 1. Inngangur

Vegna virkjunarframkvæmda í Kröflu og á Námafjallssvæði er mikilvægt að fá haldgóða mynd af því hvert hugsanlegt affallsvatn frá virkjunum myndi leita, þar sem á Mývatnssvæðinu er eitt sérstæðasta og fallegasta lífríki á landinu og það er jafnframt eitt mikilvægasta ferðamannasvæði landsins. Einkum skiptir máli hvort affallsvatnið endar í Mývatni í háum styrk og hversu lengi það er á leiðinni. Landsvirkjun hefur í samvinnu við ýmsa aðila, m.a. Orkustofnun (Halldór Ármannsson, Hrefna Kristmannsdóttir og Magnús Ólafsson, 1999) stundað rannsóknir á grunnvatni á þessu svæði. Ýmsar rannsóknir sem fram hafa farið þarna tengjast einnig grunnvatnsrannsóknum (Pétur M. Jónasson, 1979; Arnþór Garðarsson og Árni Einarsson, 1991; Iðnaðarráðuneytið, 1992; Umhverfísráðuneytið, 1993a og b; Vatnaskil, 1991 og 1993).

Mælingar á rennsli og ferilprófanir, sem gerðar voru á Mývatnssvæðinu 1981-1983, gáfu mikilvægar upplýsingar um grunnvatnsrennsli á svæðinu. Þeirri rannsókn var einkum beint að því að kanna afdrif affalls frá Kísiliðjunni og var ferilefnið sett í affallsvatn frá dælustöðinni við Helgavog. Var ferilefnið sett niður í hraunið sunnan við leiðsluna frá Helgavogi til Kísiliðjunnar, ásamt affalli, um 1 km frá botni Helgavogs. Einnig var þá sett niður ferilefni NA við borholu í Búrfellshrauni og fylgst með hvernig það kæmi fram í borholunni. Ferilprófunin hefði því helst átt að gefa upplýsingar um rennislleiðir grunnvatns á norður- og vesturhluta svæðisins og frá förgunarstöðum Kísiliðjunnar á affalli. Niðurstöður frá þessum prófunum verða að teljast fremur takmarkaðar hvað varðar leiðir affallsvatns frá hugsanlegum virkjunarstöðum í Bjarnarflagi og Kröflu.

Því var ráðist í það að nýju sumarið 1998 að gera ferilprófanir á Kröflu- og Námafjallssvæði til að kanna afrennsli vatns, sem fargað væri á yfirborði þar. Haft var samráð við Hollustuvernd ríkisins um málið og fengið samþykki heilbrigðisnefndar Norðurlands fyrir því að setja efnin niður. Prófunin fór fram í þremur áföngum. Í fyrsta áfanga var sett niður ferilefni á tveimur stöðum: í fyrsta lagi í aðalniðurfall lónsins í Bjarnarflagi og í öðru lagi í svelg þar sem lækurinn frá Kröfluvirkjun (framhald Hlíðardalslækjar) hverfur í Búrfellshraun. Í tveimur síðari áföngunum var einungis sett niður ferilefni í aðalniðurfall lónsins í Bjarnarflagi, þar sem sýnt þótti að til þess að ferlun í Búrfellshrauni skilaði einhverjum niðurstöðum þyrfti að bora nokkrar grunnar borholur vestan við Búrfellshraun til sýnatöku. Margar greinargerðir hafa komið út um áætlanir og verkáfangar ferilprófananna (Hrefna Kristmannsdóttir, 1998 a,b,c; Hrefna Kristmannsdóttir, Steinunn Hauksdóttir og Guðni Axelsson, 1998; Steinunn Hauksdóttir, 1998; Steinunn Hauksdóttir og Hrefna Kristmannsdóttir, 1999; Guðni Axelsson, 1999). Í þessarri skýrslu er tekið saman heildaryfirlit og niðurstöður verkefnisins ásamt tillögum um frekari athuganir.

## 2. Fyrri ferilprófanir

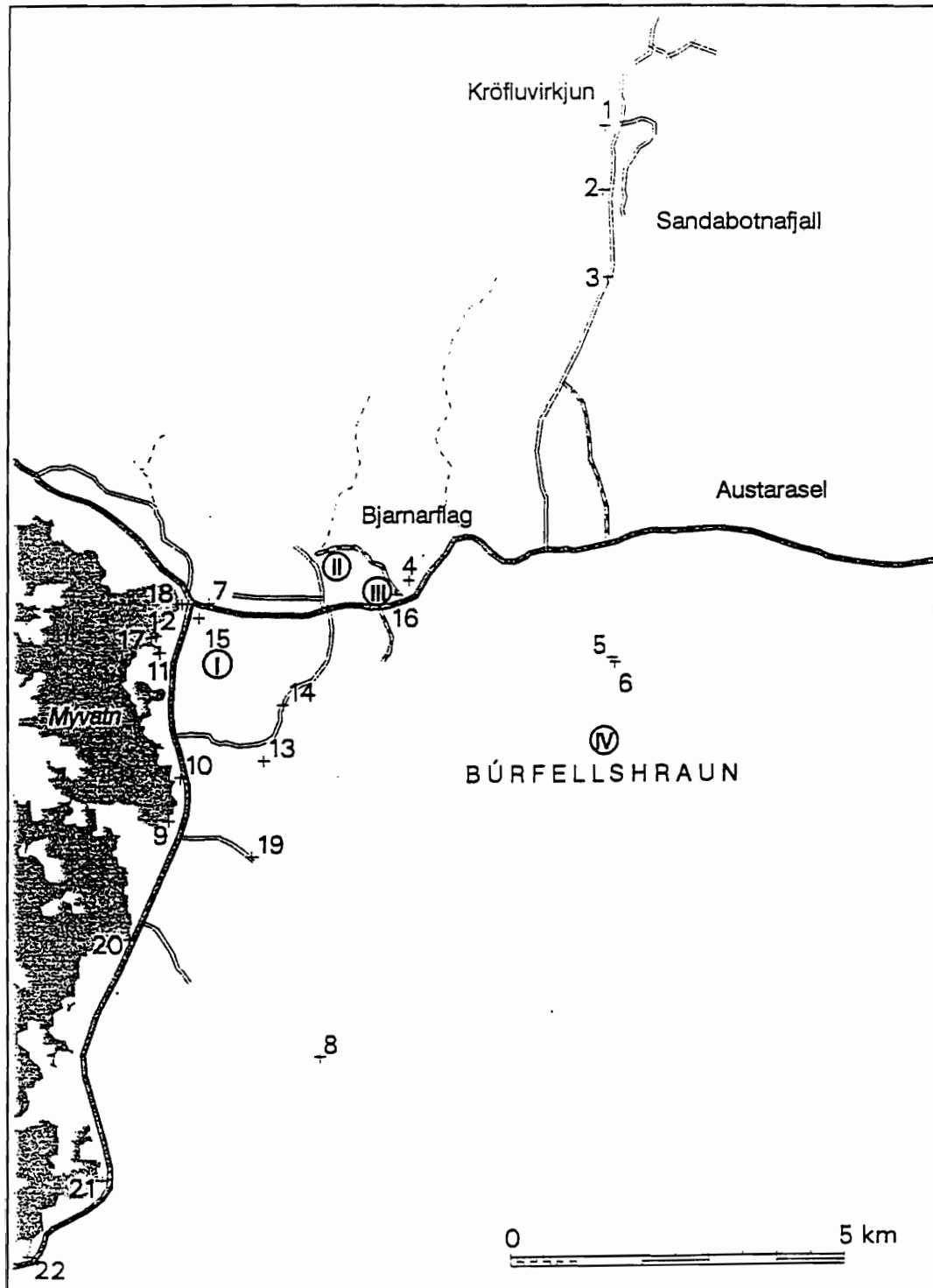
Í ferilprófun á Mývatnssvæðinu 1981 og 1982 (Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson, 1983) var notað flúorescein sem ferilefni. Sú rannsókn var unnin fyrir Kísiliðjuna í Reykjahlíð og var ætlað fyrst og fremst að kanna afdrif affalls frá verksmiðjunni. Ferilprófanirnar gáfu fremur takmarkaðar upplýsingar um leiðir affallsvatns frá hugsanlegum virkjunarstöðum í Bjarnarflagi og Kröflu eins og fram kom í inngangi.

Í þessum prófunum var ferlilefninu safnað í kolagildrum sem skipt var um á nokkurra daga fresti. Þannig er ekki unnt að greina endurheimtu og rennslisraða eins nákvæmlega og þegar sýnum er safnað beint til mælinga. Næmnin ætti þó að vera nokkru meiri en með beinni sýnatöku, en vegna annarra annmarka, eins og hárra gilda á blindsýnum, er ekki víst að næmnin sé neitt meiri með gildrunum.

Árið 1981 var ferilefnið sett niður í hraunið sunnan við leiðsluna frá Helgavogi til Kísiliðjunnar, ásamt affalli frá dælustöðinni við Helgavog (mynd 1), um 1 km frá botni Helgavogs. Sett voru niður 450 g af flúoresceini. Komið var fyrir nemum (kolagildru) á þremur stöðum: í Helgavogi, við Kálfstjörn og í Langavogi. Í skýrslunni kemur fram að svaranir hefi fengist á öllum stöðum en yfirgnæfandi mest í Helgavogi. Nánari athugun á gögnunum sýnir þó, að mati höfunda þessarar skýrslu, að varla sé um marktæka svörun að ræða nema í Helgavogi. Árið 1982 var sett niður 1 kg af flúoresceini með affallsvatni Kísiliðjunnar norðan við hráefnisþrær hennar (mynd 1). Komið var fyrir sams konar nemum og árið áður á sex stöðum: þrem þeim sömu og árið áður og auk þess í lind í Langavogi, í Grjótagjá og í borholum Kísiliðjunnar. Helstu niðurstöður þessarar prófunar voru taldar þær að affallsvatn Kísiliðjunnar bærst suður um borholusvæði Kísiliðjunnar og þaðan bærst meginstraumurinn til Helgavogs og Kálfsstrandar. Lítil hluti rennslisins virtist berast suður til Grjótagjár og þaðan til Langavogssvæðisins. Sé litið á mæligögn í þessum prófunum sést að mjög skýr svörun er í vestari borholu Kísiliðjunnar og nokkuð ljós svörun er í Helgavogi, en á öðrum stöðum er svörun mun óljósari.

Einnig var 1981 sett niður ferilefni í Hlíðardalslæk NA við borholu í Búrfellshrauni og fylgst með hvernig það kæmi fram í borholunni. Nokkrur svörun kom fram í holunni í púlsum og var sá fyrsti eftir 10 daga (óbirt gögn frá Jóni Ólafssyni). Upplýsingar um ytri aðstæður við þessa prófun eru litlar, en ekki virðist hafa verið tekin sýni á öðrum stöðum en í holunni.

Ferilprófun 1981 gaf nánast engar upplýsingar um farveg vatns úr Búrfellshrauni. Í ferilprófun í Bjarnarflagsi og á vesturhluta Mývatnssvæðis 1981 voru niðurstæðingarstaðir valdir miðað við affall frá aðfærsluleiðslu og hráefnisþróum Kísilgúrverksmiðjunnar, sem eru talsvert aðrir en affall frá Bjarnarflagslóni og Kröfluvirkjun. Svelgurinn frá affallslóninu í Bjarnarflagi tengist öðrum sprungukerfum og gætti veitt affallsvatni annað en affall bæði frá leiðslu og þróum Kísiliðju.



Mynd 1. Sýnatökustaðir 1997 - 1998 eru númeraðir frá 1 - 22. Einnig eru sýndir staðir þar sem ferilefni voru sett niður 1981 (I), 1982 (II) og 1998 (III).



### 3. Val á ferilefni í tilraun 1998

Við val á hentugum ferilefnum (Gaspar, 1987; Jón Benjamínsson, 1984) þarf að hafa að leiðarljósi að þau séu auðleysanleg, í engum eða litlum styrk fyrir í grunnvatninu og unnt að mæla þau í mjög lágum styrk. Æskilegt er að efnin séu ekki mjög dýr og einnig að mæling sé sem ódýrust þar sem fjöldi sýna verður fljótt mjög mikill. Til eru nokkur efni, sem uppfylla flest framangreind skilyrði. Um er að ræða flúrljómandi litarefni (Jón Benjamínsson, 1984) og efni eins og jodíð og brómíð, sem eru í lágum styrk í grunnvatninu en auðvelt að mæla. Geislavirk efni hafa einnig verið notuð í slíkum tilgangi en vart kemur til greina að nota þau á Mývatnssvæðinu. Algjört skilyrði er að efnin séu meinlaus lífverum í þeim styrk sem þau gætu borist út í lífkerfið. Þau efni sem helst kom til greina að nota eru flúrljómandi litarefni og kalíumjod. Flúrljómandi efnin eru NA-flúorescein, sem notað var í fyrrnefndum ferilprófunum á svæðinu, og rhódamín WT. Sá kostur er við að nota þessi tvö litarefni að þau eru mæld með sama tæki, mælitækni er svipuð fyrir bæði og auk þess tiltölulega einföld og mælingin þar af leiðandi ódýr. Na-flúorescein hefur alloft verið notað héraðs og er ódýrt í innkaupum og fremur ódýrt og einfalt að mæla það. Rhódamín WT hefur ekki verið mikið notað héraðs og það er nokkuð dýrt í innkaupi, en einfalt í mælingu. Flúorescein brotnar fljótt niður í birtu, en rhódamíníð er ljóspólnara. Bæði efnin aðsogast hins vegar nokkuð leir og gætu því rýrnað á leiðinni. Af túlkun niðurstaðna í eldri ferilprófun mátti þó ráða að flúoresceinið hafi þá skilað sér allvel á a.m.k. næstu athugunarstöðum og var því talið að flúrljómandi efni gætu hentað við aðstæður þarna.

Alkalíbrómíð (natríum- og kalíumbrómíð) og alkalíjodíð eru efni sem eru auðleyst og í litlum styrk fyrir í grunnvatninu. Einnig er unnt að mæla þau í mjög lágum styrk. Jodíð er talið hentugra ferilefni en brómíð þar sem mælinæmni er meiri, minna þarf af því og bakgrunnur er lægri í grunnvatninu. Kalíumjodíð reyndist svo heldur ódýrara en natríumjodíð. Bæði jodíð og brómíð þarf að mæla á flóknari og dýrari tækjabúnaði (jónagreini) en flúrljómandi efnin. Því er ekki um að ræða að flytja þann búnað á staðinn og reka mælingar með sumarstarfsfólki. Bæði efnin eru verulega dýrari en natríumflúorescein og rhódamín WT. Kostnaðarsjónarmiðum réðu því að nota flúrljómandi efni við ferilprófanirnar, enda fyrirfram talið að það mundi reynast vel og gefa góðar niðurstöður.

## 4. Fyrsta ferilprófun 1998 með flúoresceini og rhódamíni

### 4.1 Niðursetning

Í fyrstu ferilprófuninni, sem gerð var á Mývatnssvæðinu nú s.l. sumar voru sett niður samtímis tvö mismunandi flúrljómandi ferilefni, flúorescein í affallslæk frá Kröflu í Búrfellshrauni (mynd 1) og rhódamín WT í svelg frá lóninu í Bjarnarflagi (myndir 1,2,3). Í Búrfellshrauni hverfur lækurinn frá Hlíðardalnum með affalli frá Kröflu niður í vel afmarkaðan svelg, talsvert sunnan við holuna í Búrfellshrauni, en hana átti að nota til að fylgjast með mengun frá affallsvatni. Í Bjarnarflagi rennur skiljuvatn (úr "lóninu") frá Skiljustöðinni í afmörkuðum læk og hverfur niður um sprungu ofan í hraunið. Rennsli í læknum var ekki mælt, en talið vera margir lítrar á sekúndu. Hiti vatns í læknum, þar sem hann hverfur í hraunið, mældist 33,4°C en 35,4°C í lóninu þar sem lækurinn fellur úr því, u.þ.b. 50 m austur. Óleiðrétt GPS staðsetning niðursetningastaðanna er í viðauka 1 við skýrsluna.

Efnin voru sett niður 27. júní. Settir voru niður 3 l lausn af 20 % rhódamíni WT í svelginn úr Bjarnarflagslóninu og 4,9 kg af flúoresceini í niðurfallssvelg Hlíðardalslækjar í Búrfellshrauni. Fyrrverandi starfsmaður Orkustofnunar sem þekkti til meðhöndlunar efnanna var sendur norður sérstaklega til að annast niðursetningu þeirra. Vegna mengunarhættu mega sýnatökumenn ekki koma nálægt þeim sem setur efnin niður eftir niðursetningu né heldur staðnum. Teknir voru frá tveir 100 ml brúsar af hvorri blöndu um sig til að búa til staðallausn fyrir mælingarnar.

### 4.2 Sýnataka

Fylgst var með dreifingu efnanna með því að taka sýni í mörgum þeim lindum og gjám, sem sýni hafa verið tekin úr í tengslum við rannsóknarverkefni Orkustofnunar og Landsvirkjunar á áhrifum eldvirkni og jarðhita á grunnvatn (Halldór Ármannsson o. fl. 1999). Sýnatökustaðirnir 16 eru sýndir á mynd 1 ásamt stöðum þar sem fylgst hefur verið með efnasamsetningu grunnvatns síðustu tvö ár. Einnig eru sýndir á myndinni þeir staðir þar sem ferilefnin voru sett niður. Í viðauka með skýrslunni eru mæld GPS hnit fyrir alla þessa staði. Í töflu 1 er listi yfir nöfn staðanna ásamt tilsvarende númerum á myndinni. Sýnin voru tekin á 60 ml glerflöskur og efnagreindu sumarstarfsmenn Landsvirkjunar þau samdægurs, eða daginn eftir, á rannsóknarstofu í Kröfluvirkjun. Vikulega voru sýni send til Orkustofnunar og þau greind til samanburðar. Bæði efnin brotna niður í sólarljósi. Flúorescein brotnar fljótt niður í birtu, en rhódamínið er talsvert ljósþolnara. Gæta verður þess að sýnin séu geymd í algjöru myrkri fram að greiningu og þau mega helst ekki verða eldri en fjögurra daga.

### 4.3 Mælingar

Sýnin voru mæld í mælitæki í eigu Orkustofnunar, Turner 111 fluoromæli, sem er traust og þolir vel flutning. Sumarstarfsmenn hjá Landsvirkjun önnuðust mælingar í aðstöðu, sem sett var upp í rannsóknarstofu Kröfluvirkjunar. Þeir fengu þjálfun á Rannsóknarstofu Orkustofnunar áður en þeir fóru með tækið í Kröflustöð, þar sem mælingarnar fóru fram.

**Tafla 1. Sýnatökustaðir merktir á mynd 1.**  
*Sýnatökustaðir í ferilprófun eru feitletraðir í töflunni.*

1) Sandabotnalind - Tekið er úr dæluskúr í Kröflu
2) Gamla kaldavatnsholan í Kröflu, sem er 35 m djúp. Dælt er úr holunni á um 22 m d.
3) Hlíðardalslækur við Skarðssel
4) Austaraselslindir - Tekið í dæluskúr í Námafjalli
5) Hóla AB-01 í Búrfellshrauni-tekið á 55 m d
6) Hlíðardalslækur við holu AB-02
<b>7) Egilshola í Reykjahlíðarþorpi til móts við Stórugjá</b>
<b>8) Helgagjá sunnan Dimmuborga</b>
<b>9) Lind á bakka Mývatns við Vogaflóa</b>
<b>10) Lind á bakka Mývatns við Langavog</b>
<b>11) Lind á bakka Mývatns við Helgavog</b>
12) Lind á bakka Mývatns N við Helgavog
<b>13) Leynigjá-suðurhluti Grjótagjár við nýja baðstaðinn</b>
<b>14) Grjótagjá-karlagjái</b>
<b>15) Stóragjá við aðalop</b>
16) Glerhallarvatn-affallslón í Bjarnarflagi rétt N vegar
<b>17) Borhola í Helgavogi</b>
<b>18) Bakki Mývatns rétt neðan Bjargs</b>
<b>19) Hverfjallsgjá</b>
<b>20) Strandarvogur. Lind á bakka Mývatns</b>
<b>21) Grjótavogur. Lind á bakka Mývatns</b>
<b>22) Garðslind</b>

Á Orkustofnun voru jafnframt gerðar vikulegar samanburðarmælingar á báðum efnunum fyrstu 7 vikunnar með nákvæmara mælitæki. Meiri óreglu varð vart í mælingunum í Kröflu enda þar um daglegar mælingar að ræða og ónákvæmara tæki notað til mælinganna. Á myndum 4 og 5 eru sýndar niðurstöður mælinga í Kröflu. Eins og sést á myndunum eru miklar sveiflur og bakgrunnur virðist hár.

Á Orkustofnun voru efnin greind með Perkin Elmer 204S Spectrophotometer (Steinunn Hauksdóttir, 1998). Greiningarmörk fyrir Na-flúoreschein reyndust vera um 5 ng/l. Grunnljómun á fluoreschein er mismikil fyrir sýnatökustaðina og breytingar á þeim gildum fyrir hvern stað eru ekki marktækar. Grunnljómunargildi eru hæst í Grjótagjá, Bjargi, Egilsholu og Stórugjá en þessir sýnatökustaðir eru nálægt byggðinni í Reykjahlíð og er hér líklega um einhvers konar mengun að ræða.

Við þrjár fyrstu greiningarnar á rhódamín WT var stillingu á tækinu ábótavant sem olli því að greiningarmörk hækkuðu upp í u.þ.b. 100 ng/l. Næmni rhódamín WT greininganna reyndist vera mun minni en fyrir Na-flúoreschein greiningar og oft var ekki hægt að greina breytingu minni en 25 ng/l. Því er ekki hægt að segja að breyting á styrk rhódamíns WT fyrir hvern athugunarstað sé marktæk og er einungis um sveiflur í grunnljómun efnisins að ræða.

Niðurstöður mælinga á flúoresceini eru sýndar í töflu 2 og mælingar á rhódamíni í töflu 3. Á mynd 6 má sjá mælingar Orkustofnunar á styrk efnanna sem fall af tíma fyrir hvern sýnatökustað fyrir sig. Flúorescein styrkur er lágur og frekar stöðugur en styrkur rhódamíns virðist í fljótu bragði vera mun breytilegri. Ástæða þess eru fyrrgreind hærrí og breytileg greiningarmörk rhódamíns WT. Í mælingum Orkustofnunar er því hvergi talinn mælast marktækur styrkur á hvorugu efnanna.

Eftir að mælingar höfðu staðið í rúma tvo mánuði þótti ljóst að efnin hefðu enn ekki komið fram á neinum sýnatökustaðanna í marktækum styrk, eða a.m.k. hefði ekki reynst unnt að greina efnin vegna óreglu og hás bakgrunns. Mælingum á Orkustofnun var þá hætt, en rétt þótti þó að halda áfram sýnatöku og mælingum í Kröflu um 1-2 mánaða skeið. Starfsmenn Landsvirkjunar í Kröflu héldu svo mælingunum áfram fram á haustið en tæki og áhöldum var skilað til Orkustofnunar í desember 1998.

#### **4.4 Samanburðarmælingar á rhódamín WT og Na-flúorescein með Turner 111 fluoromæli**

Við nákvæmari skoðun gagna sem safnað var í Kröflu síðsumars og fram á haust þótti ástæða að athuga hvort rhódamín WT hafi hugsanlega komið fram en hafi mælst bæði sem rhódamín WT og Na-flúorescein með Turner 111 fluoromælinum (Steinunn Hauksdóttir og Hrefna Kristmannsdóttir, 1999). Grunnlína hækkaði bæði í mælingum á rhódamín WT og Na-flúorescein með tímanum og einnig var grunnlínan mjög óregluleg (myndir 4 og 5). Há útslög sem birtust á mörgum sýnastaðanna samtímis, oft bæði í rhódamín WT og Na-flúorescein, vöktu grun um að sama efnið væri að mælast á sitt hvorri bylgjulengdinni. Ákveðið var að kanna þetta með samanburðarmælingum þar sem reynt var að mæla rhódamín WT sem bæði rhódamín WT og Na-flúorescein.

Þegar framkvæmd samanburðarmælinganna átti að hefjast á Orkustofnun var búnaður úr Kröflu tekinn upp úr kössum. Kom þá í ljós að kúvettur sem notaðar höfðu verið til mælinganna um sumarið voru mjög óhreinar, og ljóslega ekki nothæfar í því ástandi. Þær voru þvegnar úr krómsýru og skolaðar vel úr eimuðu vatni á eftir, en nokkrar óhreinar voru teknar til hliðar og notaðar til samanburðar.

Útbúnir voru staðlar af rhódamín WT samkvæmt lýsingu (Jón Benjamínsson, 1984) og þeir settir bæði í hreinar og óhreinar kúvettur. Þeir voru fyrst mældir með rhódamín lampa og síðan mældir með flúorescein lampa. Einnig voru mæld tvö sýni frá Grjótagjá (A60) og Leynigjá (B60) tekin 20. ágúst 1998. Niðurstöður mælinganna er að finna í töflu 4.

Niðurstöður samanburðargreininganna eru þær að ekki reyndist unnt að mæla rhódamín WT sem Na-flúorescein með Turner 111 fluoromælinum. Hins vegar valda óhreinindi á glösunum valda töluverðri hækkun álestursins, bæði hvað varðar rhódamín WT og Na-flúorescein mælingarnar. Mögulega eru óhreinindin einnig völd að óvæntum toppum og óreglu í grunnlínu, eins og kemur fram þegar mæld eru misjafnlega óhrein glös. Ekki mældist rhódamín WT í sýnunum tveimur.

**Tafla 2.** Greiningar á Na-flúorescheini úr sýnum af Mývatnssvæði (ng/l).

Dagsetning	29.6.1998	2.7.1998	9.7.1998	16.7.1998	23.7.1998	30.7.1998	6.8.1998	13.8.1998	20.8.1998
Grjótagjá a	14	11	13	15	11	13	15	18	9
Leynigjá b	5	7	6	4	n.d.	7	7	7	7
Hverfjall c	n.d.	7	8	5	6	10	5	12	n.d.
Helgagjá d	5	n.d.	2	4	n.d.	n.d.	n.d.	7	7
Garðslind e	n.d.	14	4	n.d.	6	n.d.	n.d.	4	n.d.
Syðri Vogar f	n.d.	5	4	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4	n.d.
Strandavogur g	n.d.	5	4	5	n.d.	n.d.	n.d.	4	n.d.
Vogaflói h	n.d.	n.d.	4	4	n.d.	n.d.	7	7	6
Langivogur i	7	n.d.	8	11	3	n.d.	5	4	n.d.
Helgavogur j	5	5	6	5	n.d.	n.d.	7	5	4
Dælustöð k	5	7	6	4	n.d.	n.d.	5	5	4
Bjarg m	9	11	11	9	5	13	16	16	13
Egilshola n	14	11	11	15	9	13	11	11	9
Stóragjá o	9	9	11	7	5	7	15	11	13

n.d.: Undir greiningarmörkum

**Tafla 3.** Greiningar á rhódamíni WT úr sýnum af Mývatnssvæði (ng/l).

Dagsetning	29.6.1998	2.7.1998	9.7.1998	16.7.1998	23.7.1998	30.7.1998	6.8.1998	13.8.1998	20.8.1998
Grjótagjá a	n.d.	n.d.	30	75	69	68	64	100	50
Leynigjá b	n.d.	n.d.	n.d.	25	12	41	43	100	75
Hverfjall c	n.d.	n.d.	30	50	58	55	21	75	n.d.
Helgagjá d	n.d.	n.d.	n.d.	50	23	14	21	n.d.	n.d.
Garðslind e	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	35	14	21	25	n.d.
Syðri Vogar f	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	12	14	21	25	25
Strandavogur g	n.d.	n.d.	n.d.	50	12	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Vogaflói h	n.d.	n.d.	n.d.	50	23	27	n.d.	n.d.	n.d.
Langivogur i	n.d.	n.d.	30	100	n.d.	n.d.	43	n.d.	n.d.
Helgavogur j	n.d.	n.d.	n.d.	75	23	14	n.d.	25	50
Dælustöð k	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Bjarg m	n.d.	n.d.	n.d.	50	35	27	21	n.d.	75
Egilshola n	n.d.	n.d.	30	75	23	55	43	125	25
Stóragjá o	n.d.	n.d.	30	75	35	27	21	50	100

n.d.: Undir greiningarmörkum

**Tafla 4.** Samanburðarmælingar á flúoresceini og rhódamíni.

Staðlar ng/l nnn	Álestur rhódamín WT		Álestur Na-flúoreschein	
	Hreinar kúvettur	Óhreinar kúvettur	Hreinar kúvettur	Óhreinar kúvettur
Eimað vatn	6,0		1,5	
150	12,0	29,0*	2,0	8,5*
300	17,5	18,5**	1,5	3,0**
750	34,0	46,0	1,5	6,5
1500	64,5	77,5	1,5	5,5
Sýni A60	6,0		3,0	
Sýni B60	7,0		3,0	

\* Kúvetta var áberandi mikið óhrein

\*\* Kúvetta var minna óhrein en aðrar

Ástæða þess að styrkur beggja efnanna breytist á sama hátt á hverjum sýnatökustað er því ekki vegna þess að tækið skilji illa milli efnanna heldur er líklegt að sömu glösin hafi verið notuð til mælinga á báðum efnunum og því sömu óhreinindin mæld í bæði skiptin. Það er því illmögulegt að greina milli þess að verið sé að mæla endurheimtu rhódamíns WT eða hvort um hækkun álesturs vegna óhreininda sé að ræða.

#### 4.5 Helstu niðurstöður

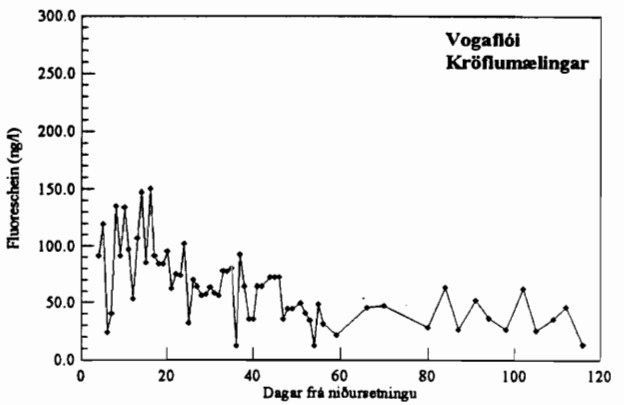
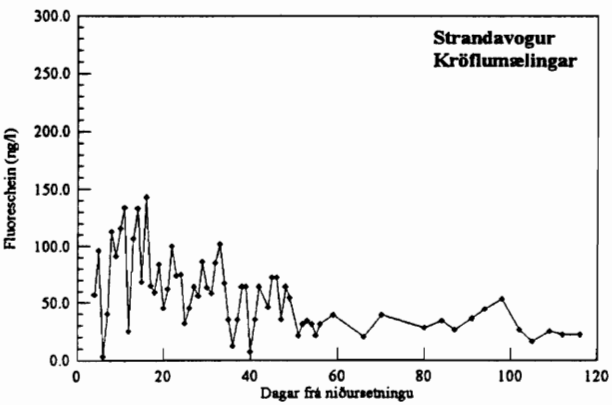
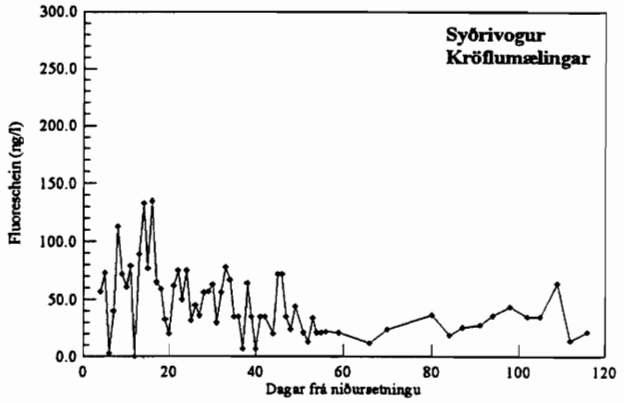
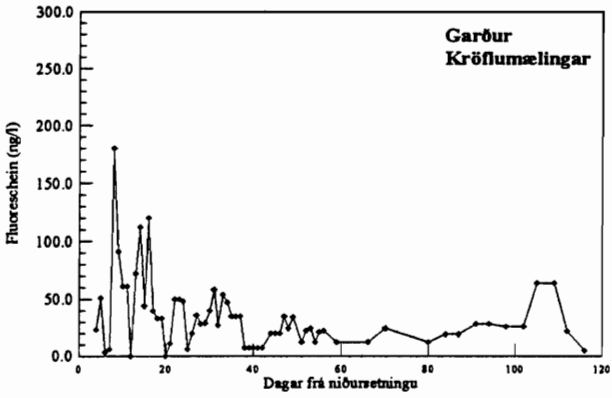
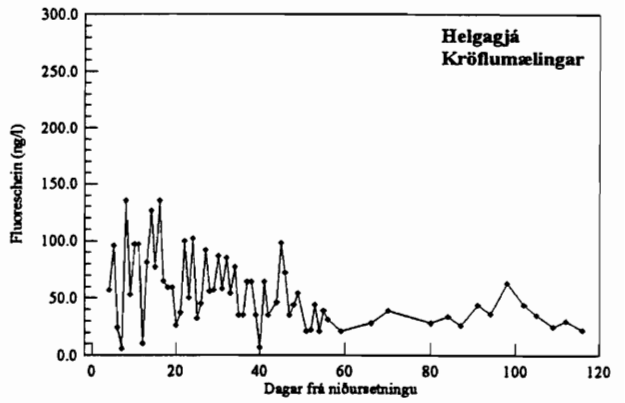
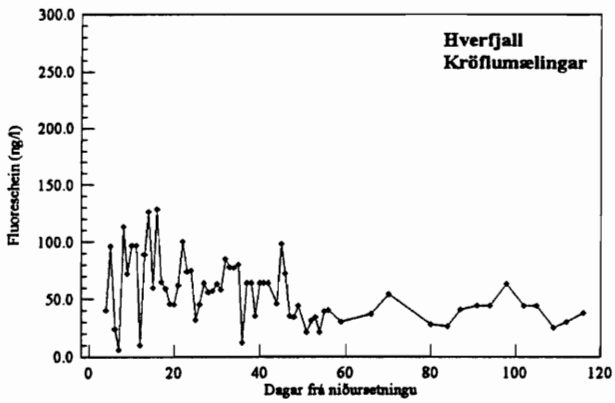
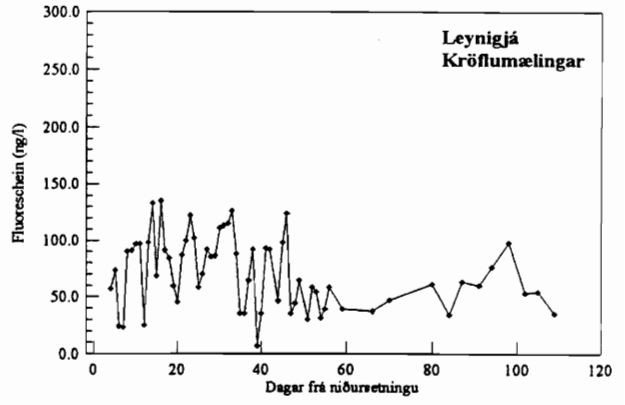
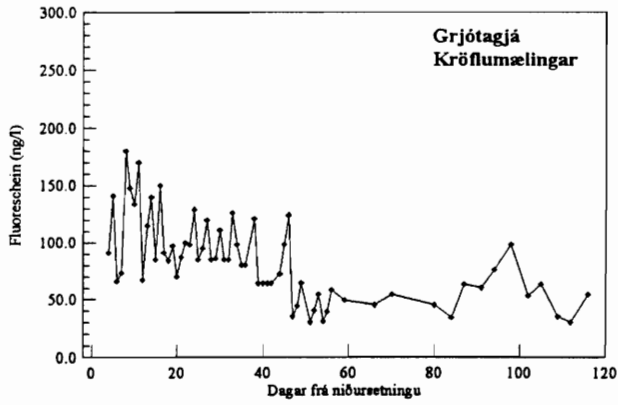
Þrátt fyrir að mistök virðist hafa átt sér stað í mælingum í Kröflu þá mældust ekki marktæk frávík í samanburðarmælingum á Orkustofnun. Þar sem þær mælingar voru einungis vikulegar gætu þó hafa komið fram toppar í styrk sem mælingarnar hafa ekki hitt á. Sérstaka óheppni virðist þó þurfa til að tapa af þeim á öllum sýnatökustöðum. Því virðist nokkuð ljóst að hvorugt efnanna skilaði sér á þeim mánuðum sem prófunin stóð yfir. Hvað flúoresheinið varðar kom það ekki mjög á óvart, þar sem mjög langt er frá niðurstetningarstaðnum í Búrfellshrauni í næstu sýnatökustaði. Einnig er óvíst hvort grunnvatn rennur yfirleitt til vesturs frá Búrfellshrauni. Lagt hafði verið til að bora nokkrar athugunarholur vestan Búrfellshrauns til að geta fylgst með hugsanlegri dreifingu efnisins til vesturs, en það komst ekki í framkvæmd. Hins vegar hafði verið talið næsta öruggt að rhódamínið kæmi fram í einhverjum sýnatökustaðanna. Til að skýra það að efnið mældist ekki var einkum litð til aðsogunar á kísilgúr. Þegar fyrir 1980 varð vart við kísilþörungum í grunnvatni á Mývatnssvæðinu (Jón Ólafsson, 1979a) og líklegt að enn meiri uppsöfnun hafi átt sér stað á undanförunum tuttugu árum. Rhódamín WT aðsogast talsvert á jarðveg og einkum leir og talið að talsvert meiri hætta sé á aðsogun þess efnis en flúoresheins.



**Mynd 2.** Vesturjaðar affallslónsins í Bjarnarflagi og afrennislækur þess. Við svelginn þar sem lækurinn hverfur ofan í lónið sjást tveir plaststampar. *Ljós. Magnús Ólafsson.*

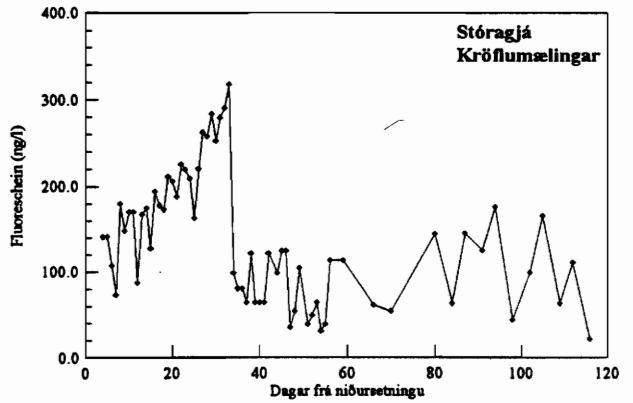
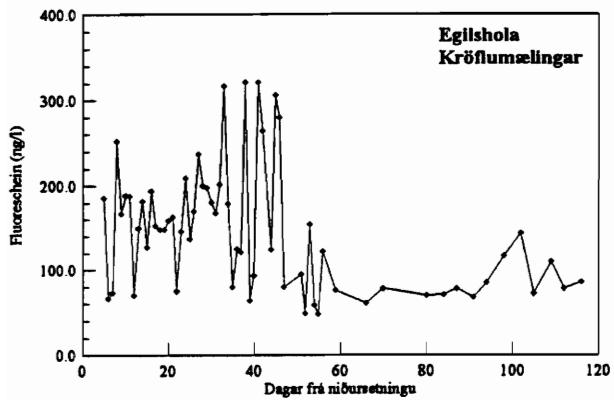
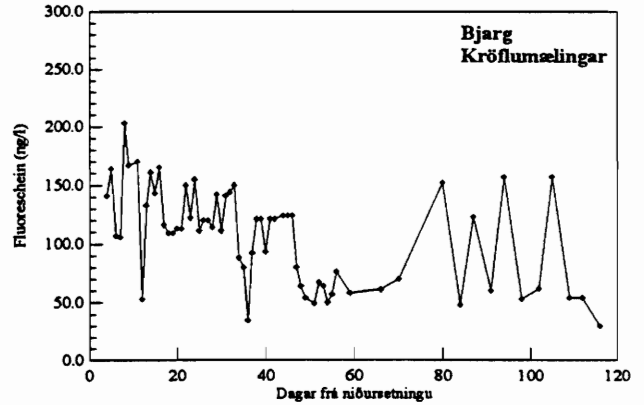
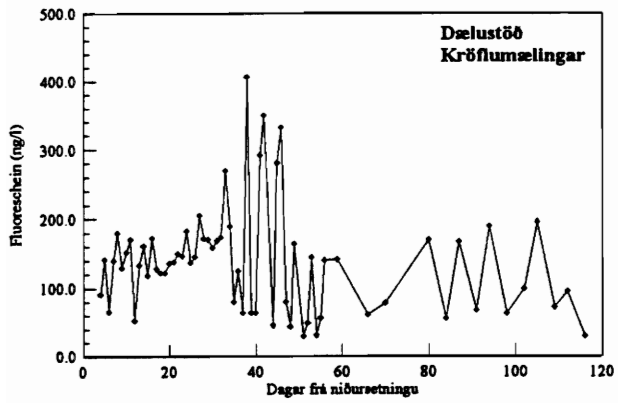
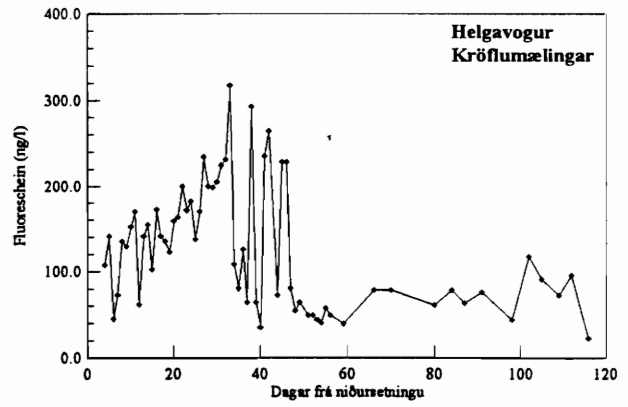
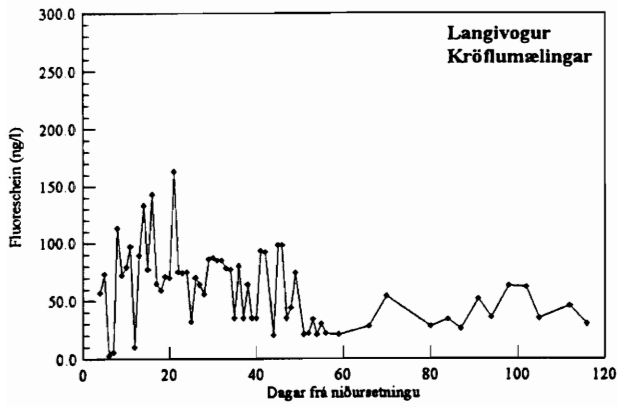


**Mynd 3.** Nærmynd af svelgnum í affallslæk Bjarnarflagslónsins. *Ljós. Magnús Ólafsson.*

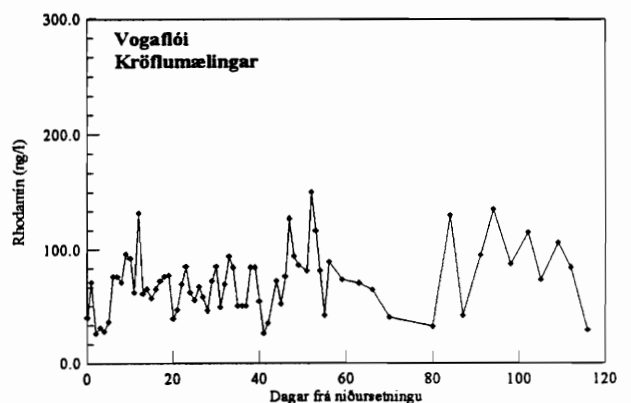
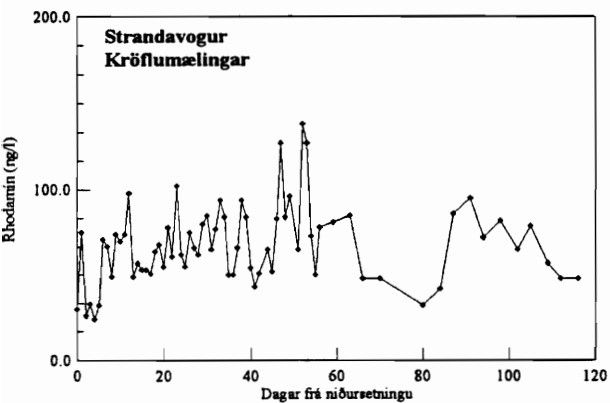
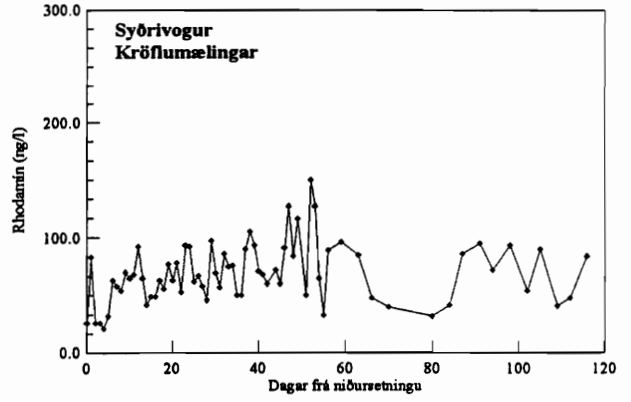
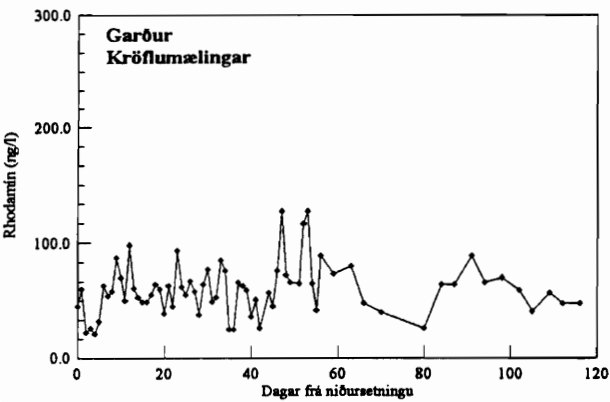
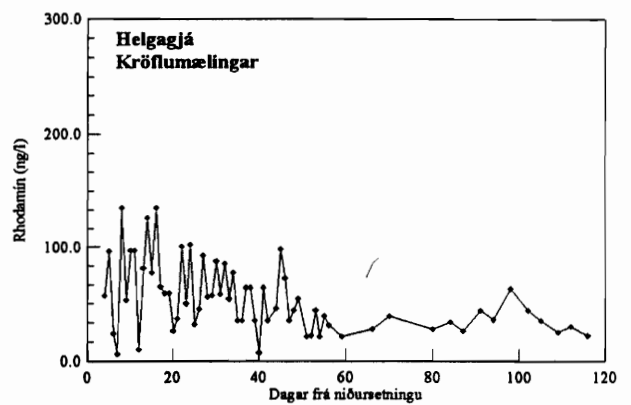
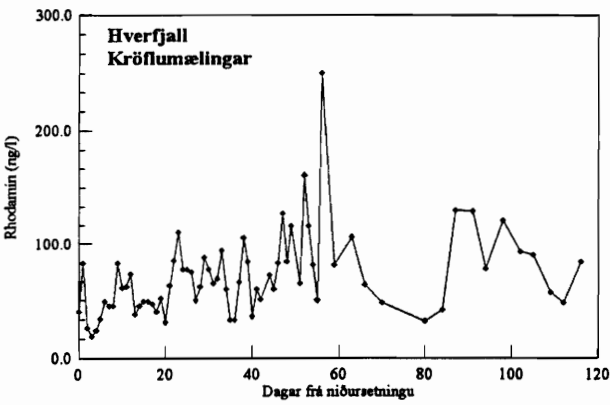
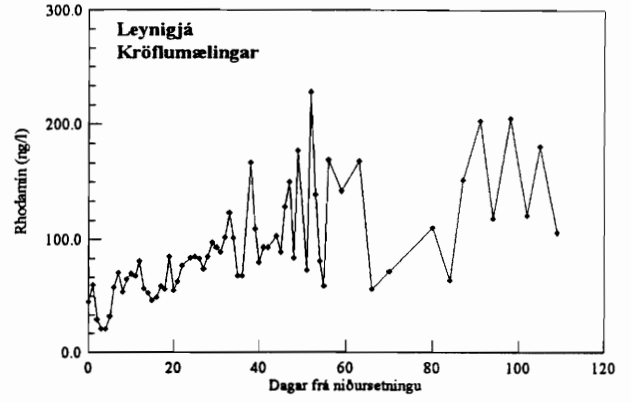
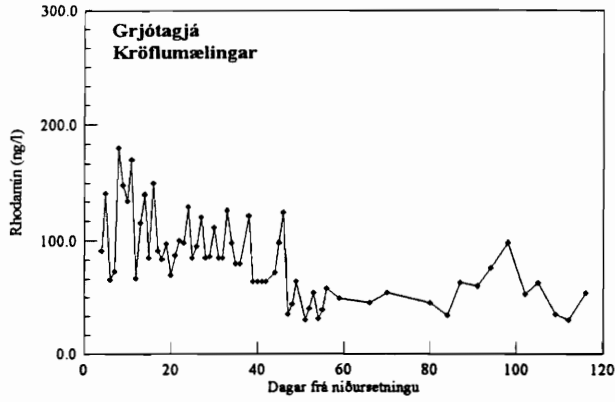


Mynd 4. Niðurstöður mælinga á flúoresceíni á rannsóknarstöfu í Kröflu sem fall af tíma fyrir hvern sýnatökustað.

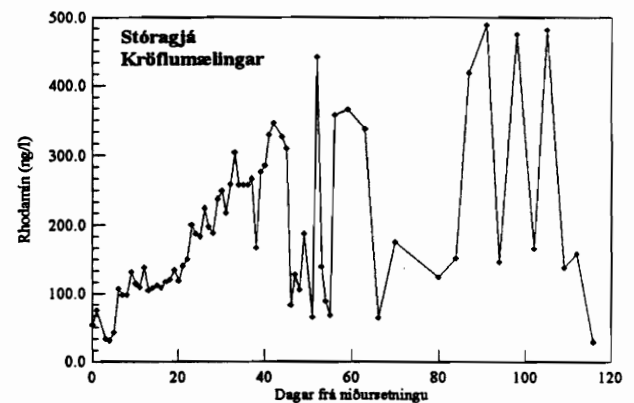
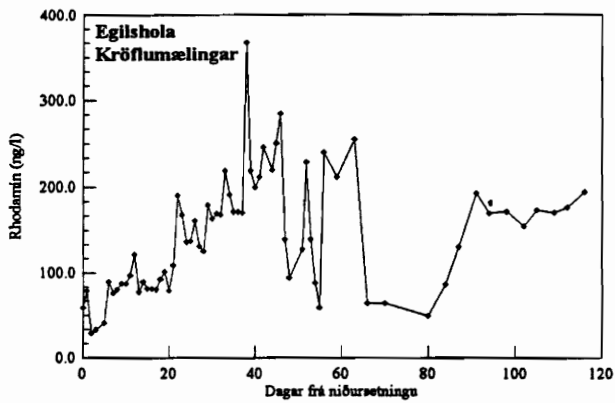
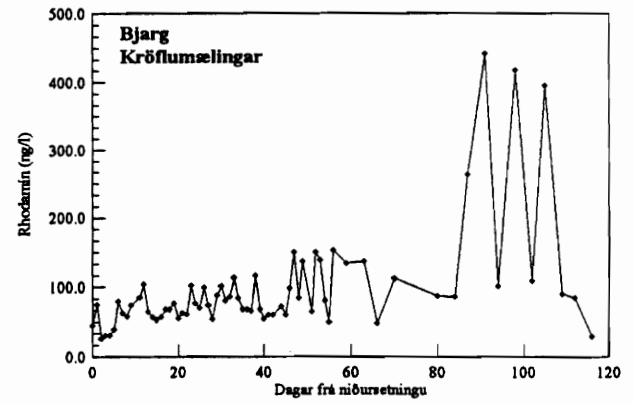
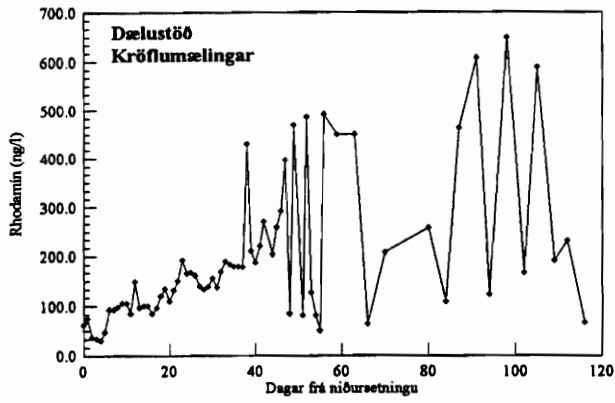
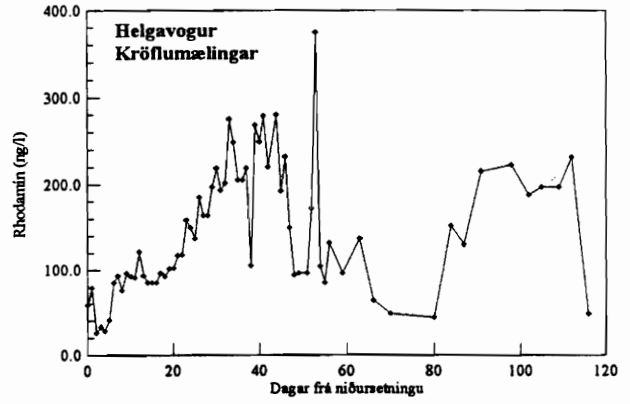
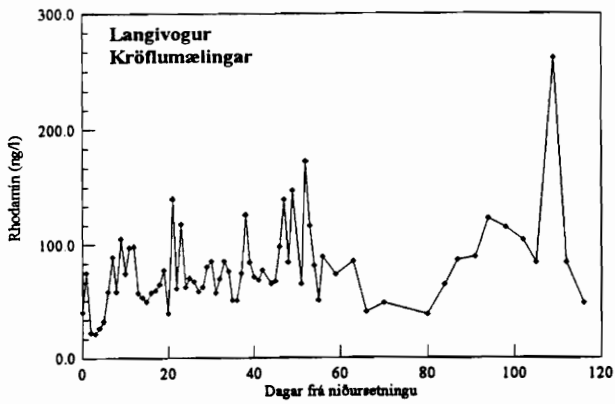




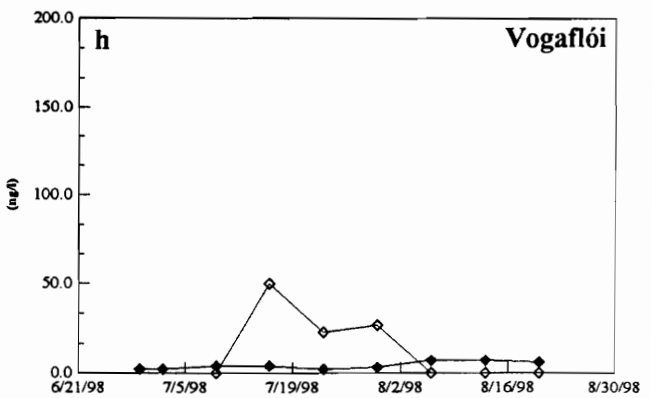
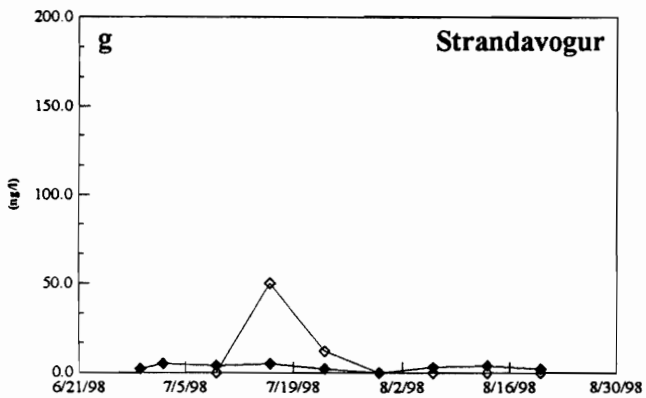
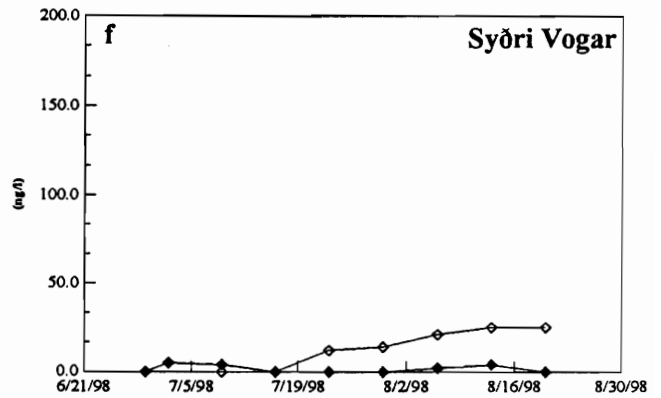
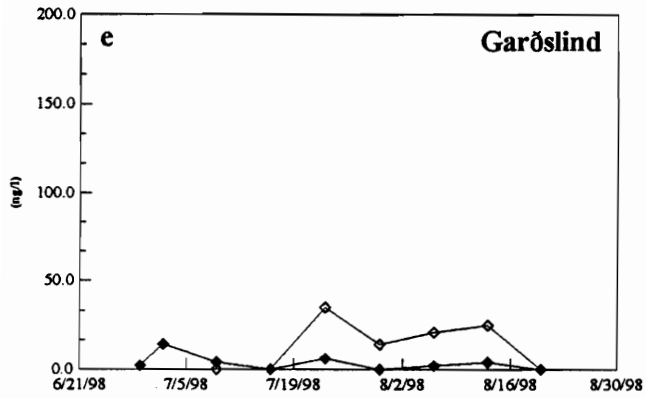
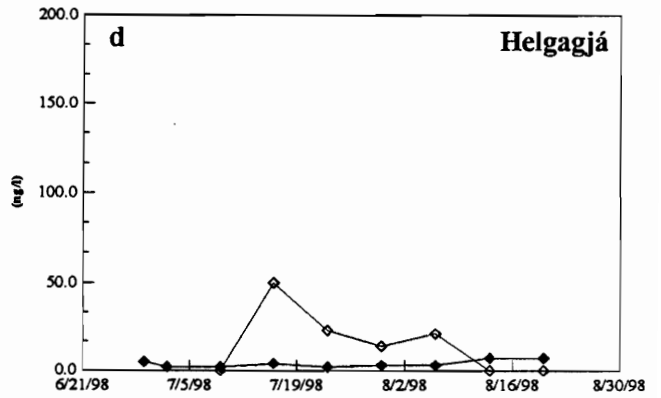
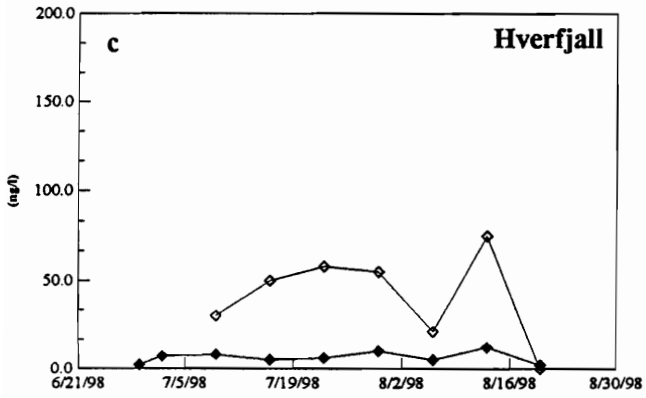
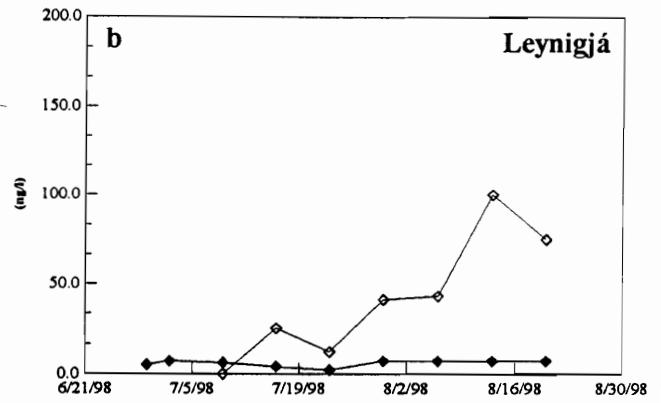
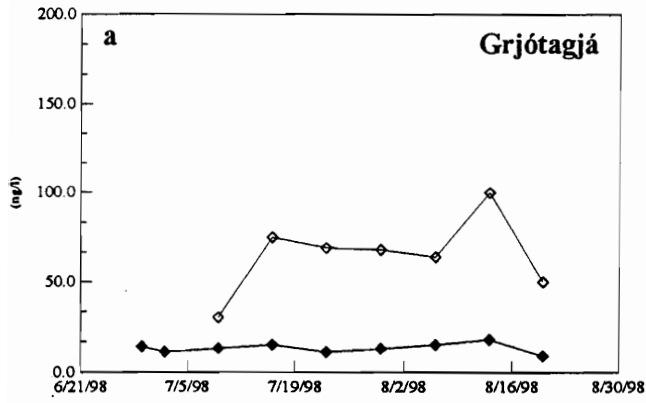
**Mynd 4 frh.** Niðurstöður mælinga á flúoresceini á rannsóknarstofu í Kröflu sem fall af tíma fyrir hvern sýnatökustað.



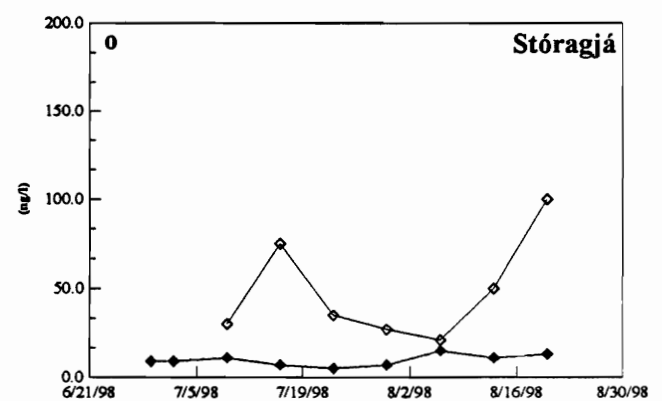
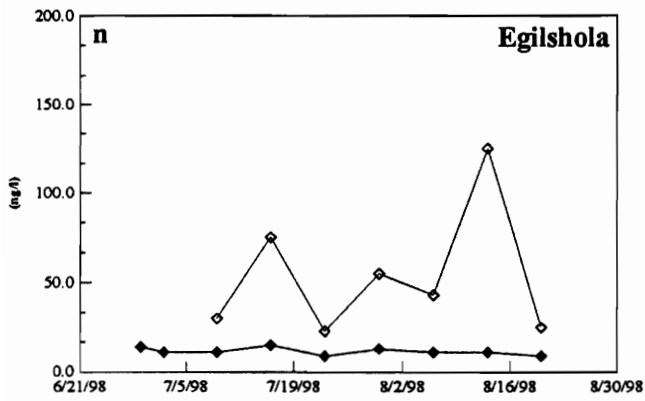
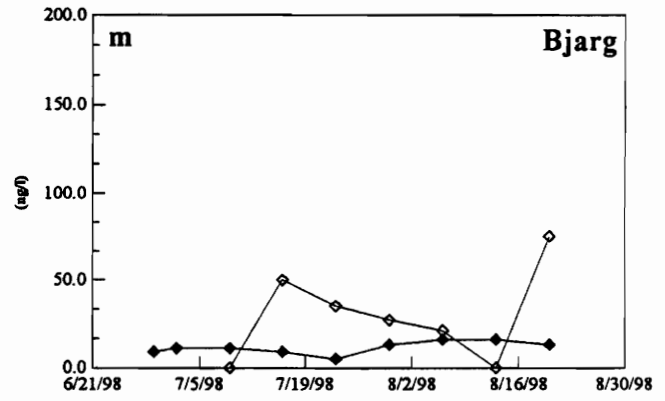
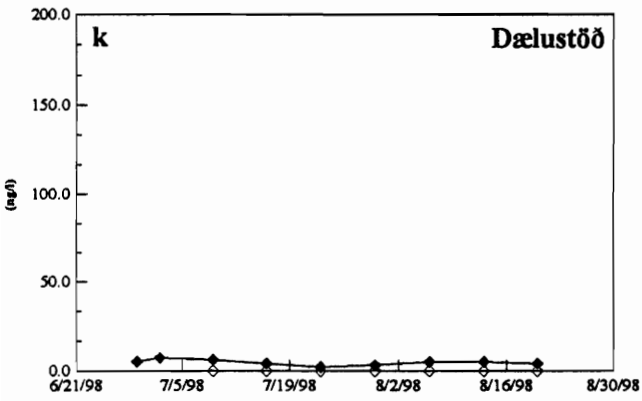
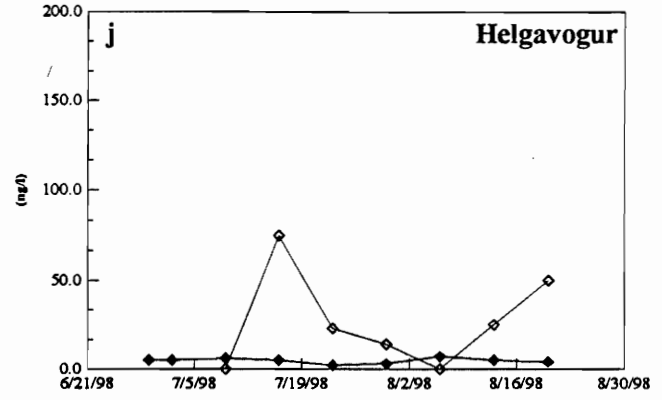
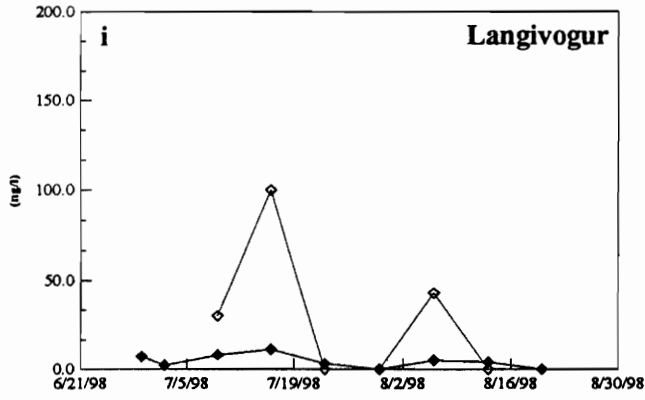
Mynd 5. Niðurstöður mælinga á rhodamíni á rannsóknarstofu í Kröflu sem fall af tíma fyrir hvern sýnatökustað.



**Mynd 5 frh.** Niðurstöður mælinga á rhódamíni á rannsóknarstofu í Kröflu sem fall af tíma fyrir hvern sýnatökustað.



**Mynd 6.** Mælingar Orkustofnunar á styrk beggja efnanna, flúoresceins og rhódamíns, sem fall af tíma fyrir hvern sýnatökustað. Opnir tíglar rhódamín, fylltir tíglar flúorescein.



**Mynd 6 frh.** Mælingar Orkustofnunar á styrk beggja efnanna, flúoresceins og rhódamíns, sem fall af tíma fyrir hvern sýnatökustað. Opnir tíglar rhódamín, fylltir tíglar flúorescein.

## 5. Önnur ferilprófun með kalíumjodíði

### 5.1 Val á ferilefni, magn og bakgrunnur

Þegar flúrljómandi ferilefnin úr fyrstu prófuninni höfðu ekki komið fram eftir um tvo mánuði og líkur á að prófunin reyndist nánast gagnslaus, var metið hvað gera skyldi. Þótti freistandi að halda áfram prófunum með því að setja annað ferilefni niður í Bjarnarflag-slónið. Envar talið gagnslítið að gera frekari ferilprófanir á affalli frá Búrfellshrauni fyrr en búið væri að bora athugunarholur á svæðinu vestan við hraunið samkvæmt fyrri tillögum. Sumarstarfsmaður þjálfaður í sýnatöku var enn á staðnum og talið æskilegt að halda áfram sýnatöku og greiningu flúrljómandi efnanna nokkru lengur. Vegna grunsemda um aðsog á kísilgúr þótti ekki álitlegt að setja niður litarefni skyld þeim sem notuð voru í fyrri prófun auk þess sem það gæti hugsanlega truflað niðurstöður fyrri prófananna. Að athuguðu máli var talið að hentugasta ferilefnið við áframhaldandi prófun væri kalíumjodíð. Það er að vísu dýrara en alkalíbrómíð en þar sem mælinæmni er meiri þarf minna af því og bakgrunnur er lægri í grunnvatninu.

Á grundvelli mælinga á bakgrunnsgildi í öllum sýnatökustöðum var lagt til að sett væri niður um 80-100 kg af efninu í svelginn frá lóninu í Bjarnarflagi. Styrkur jodíðs er um 0,006 mg/l í lóninu en < 0,0005 mg/l í köldu grunnvatni á svæðinu. Miðað var við, út frá eldri forsendum um rennslisraða og írennsli í Mývatn, að styrkur í grunnvatninu væri alltaf undir 1 mg/l þegar vatnið komi fram á athugunarstöðum. Eins og áður var haft samráð við Hollustuvernd ríkisins um málið og taldi hún að efnið væri hættulaust í þeim styrk sem það gæti náð í grunnvatnskerfinu. Heilbrigðisfulltrúinn á Húsavík fékk síðan í framhaldi af þeirri umsögn, og umsögn Náttúruverndar ríkisins, samþykki heilbrigðisnefndar Norðurlands fyrir því að setja efnið niður.

### 5.2 Niðursetning og sýnataka

Miðvikudaginn 16. september 1998 voru sett niður 100 kg af kalíum jodíði á sama stað og rhódamín var sett niður tæpum þremur mánuðum fyrr, þann 27. júní. Starfsmaður Orkustofnunar fór sérstaklega norður til að koma efninu niður, en ekki var sama varúð höfð og við niðursetningu litarefnanna vegna minni hættu á mengun. Efnið kom í fjórum 25 kg stömpum og var hver skammtur leystur upp í 50 l af vatni sem tekið var úr affallsslæknum. Fyrsti skammturinn fór niður kl. 11:20, sá næsti kl. 11:25 sá þriðji kl. 11:30 og loks sá fjórði og síðasti kl. 11:35. Efnið leystist vel upp og var upplausnin brúnleit. Nokkur grömm voru tekin úr stömpum 1 og 3 í þeim tilgangi að búa til staðallausn fyrir mælingarnar.

Safnað var sýnum á sömu sýnatökustöðum og fyrri ferilprófun. Þar sem kalíumjodíð er stöðugt í lausn og því ekki nauðsynlegt að greina sýnin jafnóðum var þeim safnað saman í tvær vikur áður en þau voru send á Orkustofnun til greiningar. Vegna misskilnings og anna starfsmanns í Kröflu hófst sýnataka ekki fyrr en á öðrum til þriðja degi eftir niðursetningu og var auk þess strjál fyrstu dagana. Vegna niðurstöðu úr fyrri prófunum töldu menn einnig ólíklegt að efnið kæmi fram á fyrstu 1-2 dögum. Í ljós kom að það var mjög bagalegt að sýnataka var svona strjál fyrstu dagana. Sýnum sem tekin voru til

mælinga á flúrljómandi efnum hafði verið fargað nær jafnóðum þar sem þau efni geymast ekki svo ekki var unnt að mæla kalíumjoðið í þeim.

Sýnatöku og mælingum á joðiði var svo haldið áfram fram í nóvember og einnig var mælt joðið í sýnum, sem tekin voru á nokkrum sýnatökustaðanna (sbr. kafla 6) í desember og í janúar 1999.

### 5.3 Mælingar

Joðiðið var mælt með jónaskilju á rannsóknarstofu Orkustofnunar. Eins og fram kom hér að ofan var sýnum safnað saman í tvær vikur áður en þau voru send á Orkustofnun til greiningar og voru þá mældar stikkprufur og þétt eftir þörfum til að lágmarka greiningarkostnað. Greiningarmörk joðiðs eru um 0,0005 mg/l. Allar mælingar á styrk joðiðs í sýnunum eru sýndar í töflu 5 og á mynd 7 og 8. Niðurstöður úr mælingunum koma talsvert á óvart þar sem hæstu mæligildin koma fram við Hverfjall, Helgavog og Bjarg þann 19. september, sem er fyrsti sýnatökudagur á þessum stöðum. Verulega lægri gildi mælast í Grjótagjá þar sem búist hafði verið við hæstum styrk. Í Leynigjá mælist hærri styrkur en í Grjótagjá og þar kemur fram hámark u.þ.b. viku eftir niðursetningu. Efnid virðist koma fram bæði í Garðslind og í Syðri Vogum eftir 3-6 daga. Í Langavogi koma fram nokkrir púlsar 3-10 dögum eftir niðursetningu. Á Bjargi kemur fram vottur á 11. og 12. degi og í Hverfellsgjá um svipað leyti. Eftir tvær vikur mælist grunngili í öllum mælistöðum nema í Egilsholu þar sem 3. og 8. nóvember koma fram hækkuð mæligildi. Í Grjótagjá fór joðið aftur að greinast um síðustu áramót, en sýnum var safnað þar í desember og janúar í síðasta hluta ferilprófananna. Ekkert mældist í sýnum frá öðrum sýnatökustöðum sem safnað var úr þá.

### 5.4 Helstu niðurstöður

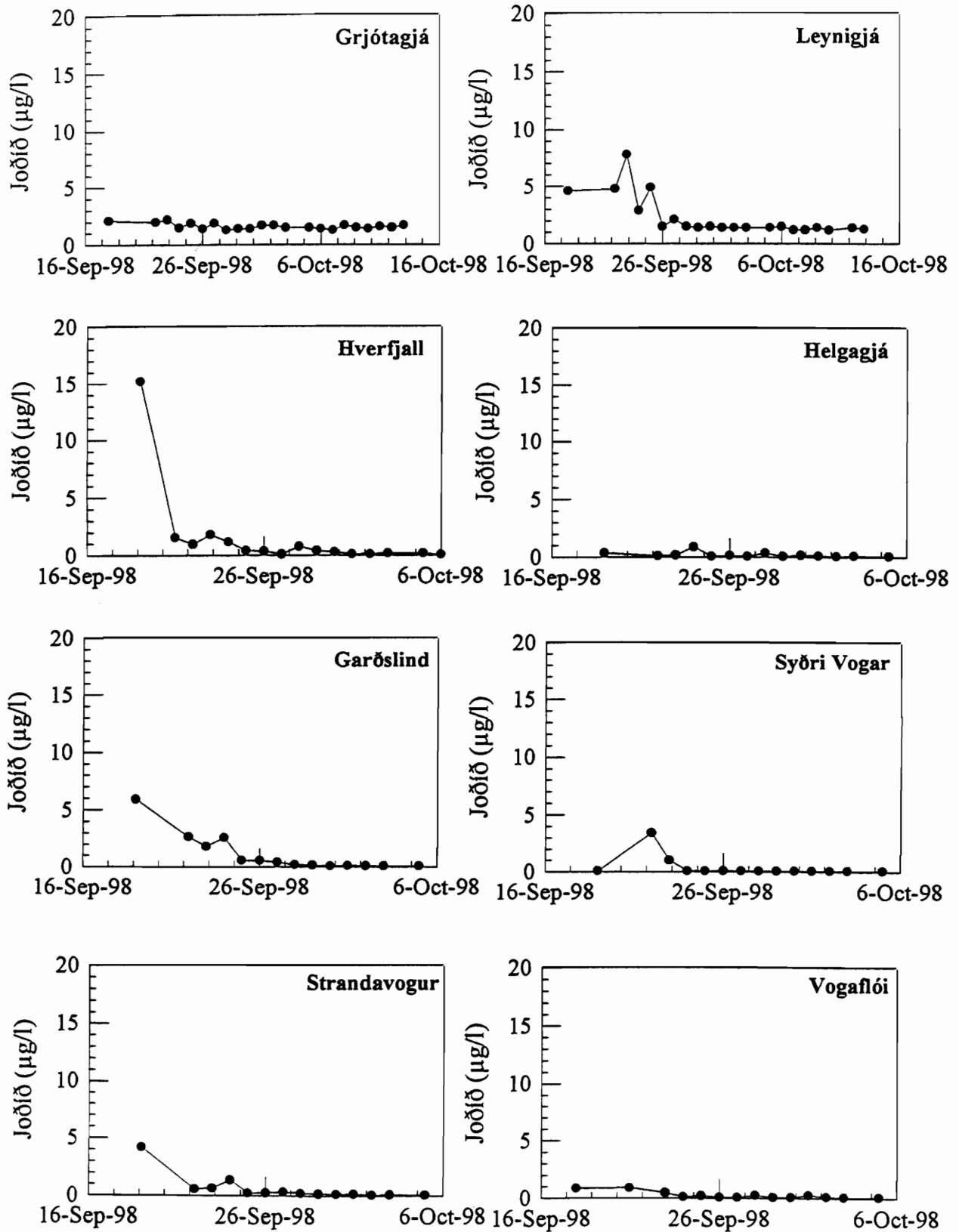
Vegna strjálra mælinga er nokkuð erfitt að túlka niðurstöður mælinganna en ljóst er að ferilefnið hefur komið fram. Hugsanlegt er að það hafi að mestu verið farið fram hjá á sumum sýnatökustöðunum þegar fyrstu sýnin voru tekin. Sé það tilfellið hlýtur hluti affallssins úr lóninu að berast um svæðið með hröðum yfirborðsstraumum. Miðað við niðurstöður úr fyrri ferilprófunum var það fremur óvænt niðurstaða. Reiknað hafði verið með að affallið blandaðist og bærist niður í grunnvatnskerfið og þar væri rennslisraði svipaður og fyrri ferilprófanir gáfu til kynna. Mældur rennslisraði í gjám á svæðinu (Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson, 1983) er 1-3 m/mín, en fremur ólíklegt var talið að affallið bærist um allt svæðið með þeim hraða þótt hluti þess gæti borist hratt um eftir að það kemst í gjárnar. Afgangurinn skilar sér væntanlega á mun lengri tíma með hægari hluta grunnvatnsstraumsins. Það að joðið fer aftur að greinast í sýnum úr Grjótagjá um síðustu áramót styrkir þessa tilgátu. Hvaða löngu leið það hefur borist er erfitt að segja, en athyglisvert væri að hafa mælingar á joðiðstyrk í sýnum úr fleiri vatnsbólum í jafnlangan tíma.

Tafla 5. Greiningar á jodíð úr sýnum af Mývatnssvæði ( $\mu\text{g/l}$ ).

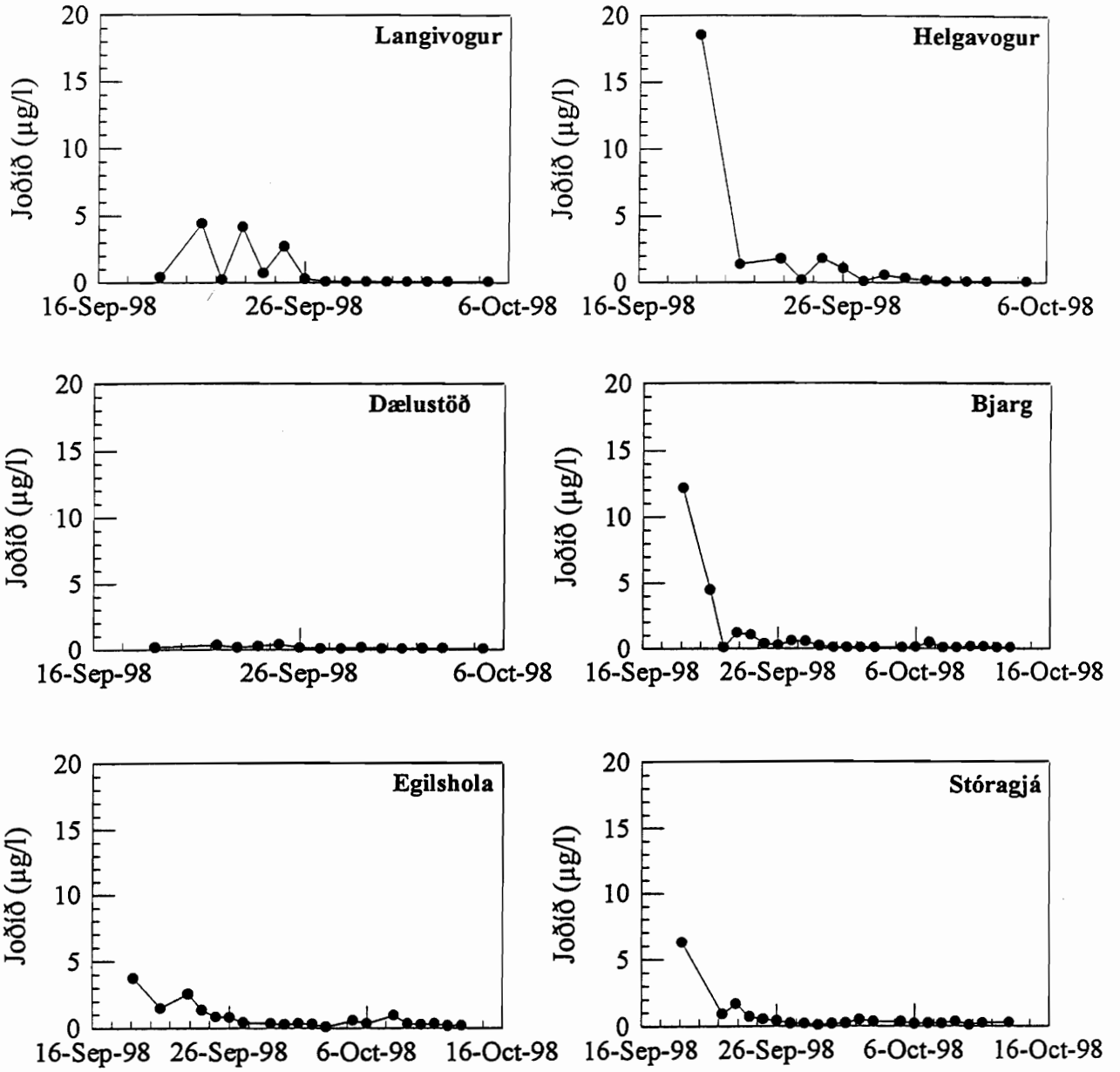
Dagsetning	Grjótagj a	Leynigj b	Hverfjal c	Helgagj d	Garðslin e	Syðri Voga f	Strandavogu g	Vogafló h	Langivogu i	Helgavogu j	Dælustö k	Bjarg m	Egilshol n	Stóragjá o
18.9.1998	2,1	4,6	-	<0,5	5,93	<0,5	4,2	0,88	<0,5	18,57	<0,5	12,18	-	-
19.9.1998	-	-	15,21	<0,5	-	-	-	-	4,44	1,41	-	4,47	3,73	6,29
21.9.1998	-	-	1,56	<0,5	-	-	-	0,93	<0,5	-	<0,5	<0,5	1,49	-
22.9.1998	2	4,8	0,98	<0,5	2,66	3,45	0,59	-	<0,5	-	<0,5	<0,5	-	0,92
23.9.1998	2,2	7,8	1,81	<0,5	1,81	1,03	0,68	<0,5	4,19	1,82	<0,5	1,21	2,54	1,66
24.9.1998	1,5	2,9	1,18	0,91	2,6	<0,5	1,39	<0,5	0,74	<0,5	<0,5	1,07	1,36	0,72
25.9.1998	1,9	4,9	<0,5	<0,5	0,58	<0,5	<0,5	<0,5	2,76	1,86	<0,5	<0,5	0,85	0,55
26.9.1998	1,4	1,5	<0,5	<0,5	0,59	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	1,09	<0,5	<0,5	0,82	<0,5
27.9.1998	1,9	2,1	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,62	<0,5	<0,5
28.9.1998	1,3	1,5	0,8	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,57	<0,5	0,56	-	<0,5
29.9.1998	1,4	1,4	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
30.9.1998	1,4	1,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
1.10.1998	1,7	1,4	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
2.10.1998	1,7	1,4	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
3.10.1998	1,5	1,4	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
5.10.1998	1,5	1,4	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
6.10.1998	1,4	1,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	0,58	<0,5
7.10.1998	1,3	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5
8.10.1998	1,7	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	0,96	<0,5
9.10.1998	1,5	1,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5
10.10.1998	1,4	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5
11.10.1998	1,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5
12.10.1998	1,5	1,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5
13.10.1998	1,7	1,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	<0,5	<0,5	<0,5

- ekki sýni

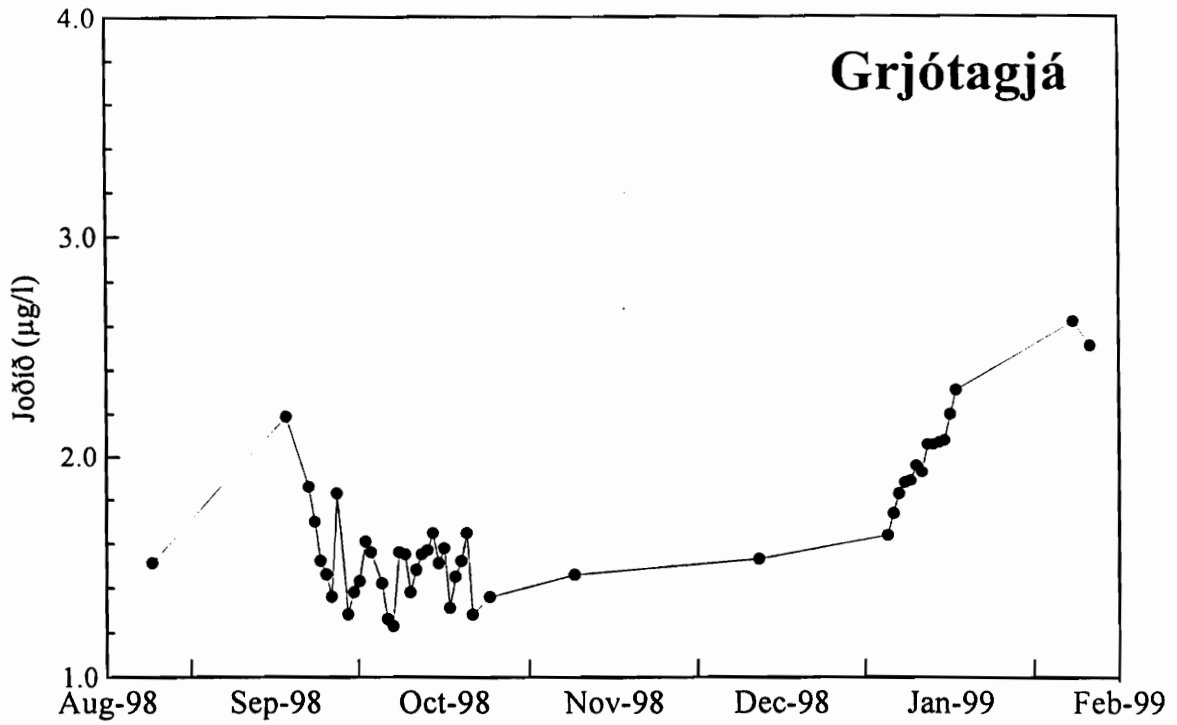




Mynd 7. Mælingar á kalíumjoði með tíma á sýnatökustöðum.



Mynd 7 frh. Mælingar á kalíumjodíði með tíma á sýnatökustöðum.



Mynd 8. Mælingar á kalíumjodíði í Grjótagjá fram í janúar 1999.

## 6. Lokaáfangi prófana í nóvember 1998 með flúoresceini

### 6.1 Efnisval og niðursetning

Síðasti áfangi ferilprófananna var stutt prófun með flúoresceini sem ferilefni. Tilgangurinn var fyrst og fremst að fylla upp í þær eyður sem stöfuðu af strjálly sýnatöku í fyrri ferilprófun og sannreyna tilvist hraðra strauma sem prófun með kalíumjodíði benti til. Ástæða þess að freistað var að nota flúrljómandi efni en ekki kalíumjodíð aftur var í fyrsta lagi kostnaðarsjónarmið, en flúorescein er miklu ódýrara en kalíumjodíð og mun ódýrara að mæla það. Einnig var litið til þess hversu stutt var liðið frá síðustu prófun með kalíumjodíðinu og ljóslega einungis hluti þess kominn fram. Samkvæmt fyrirliggjandi upplýsingum um efnin var jafnframt talið að minni líkur væru á aðsogi flúoresceins en rhódamíns WT á kísil og kísilgúr og því líklega minni hætta á að það hyrfi en rhódamínið. Þó er ljóst að flúorescein getur einnig aðsogast, einkum á lífræn efni, og það er jafnframt mun viðkvæmara fyrir dagsbirtu og brotnar fyrir niður í ljósi en rhódamín. Á þessum árstíma ætti sú hætta reyndar að vera í lágmarki.

Setja átti flúoresceinið niður 14. desember en vegna óveðurs dróst það fram til 4. janúar. Efnið var sett niður á sama stað í svelg í affallslæk Bjarnarflagslónsins og rhódamínið og kalíumjodíðið í tveimur fyrri ferilprófununum um sumarið. Eins og fyrr var gætt mikillar varkárni til að komast hjá mengun. Mánudaginn 4. janúar flaug starfsmaður Orkustofnunar, norður með ferilefnið uppleyst á kút og hellti því niður í svelginn kl. 11:15. Efnið var 10 kg af Na-flúoresceini, sem var leyst upp í 2 x 20 lítrum af vatni. Sama varúð var höfð vegna mengunarhættu og við fyrri niðursetningar á litarefnum. Hafði starfsmaðurinn, sem setti efnið niður, því engin samskipti við sýnatökumenn eftir niðursetninguna og þeir komu ekki nálægt niðursetningastað meðan á prófun stóð. Hann kom heldur ekki nálægt mælingu efnanna á rannsóknarstofu Orkustofnunar.

### 6.2 Sýnataka

Í þessari prófun voru einungis voru valdir úr sex af fyrri sýnatökustöðum, bæði vegna kostnaðar og einnig vegna erfiðleika á sýnatöku á þessum árstíma. Við staðarval var höfð hliðsjón af niðurstöðum úr prófuninni á undan með kalíumjodíði. Listi yfir sýnatökustaðina er í töflu 6.

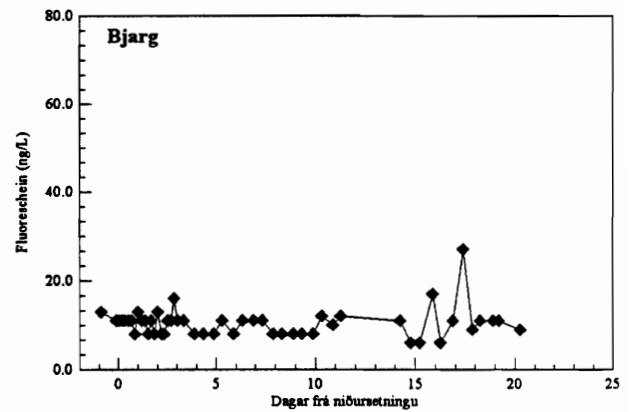
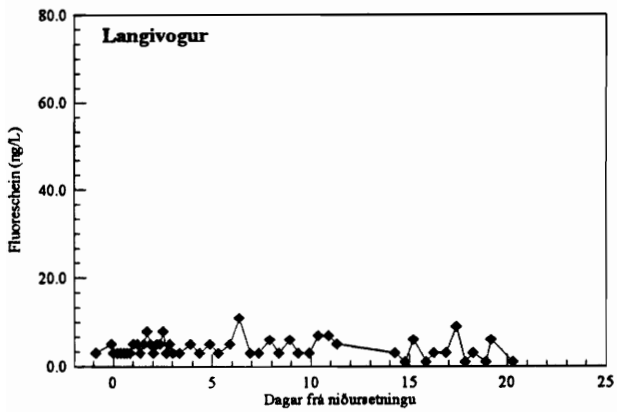
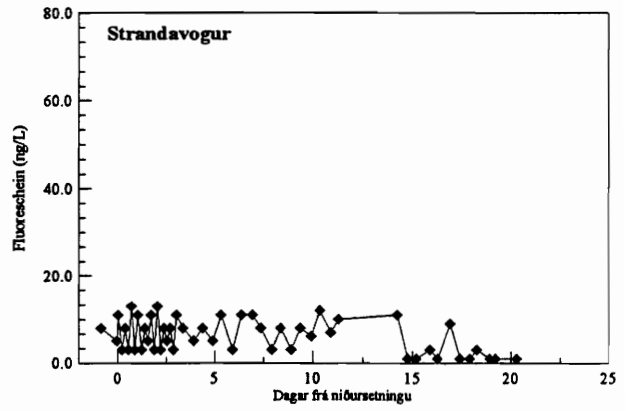
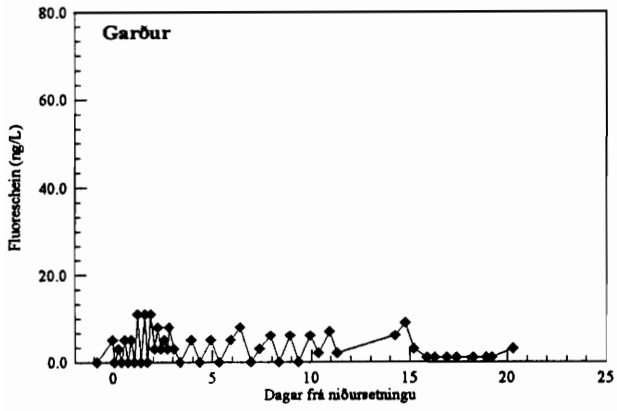
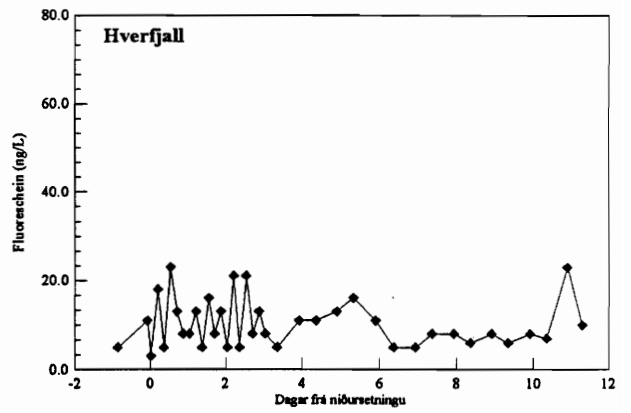
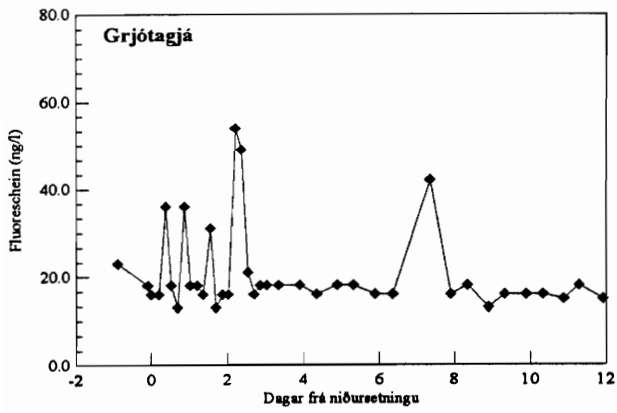
Sýnum til mælinga á grunngildum var safnað í fjóra daga fyrir niðursetningu á öllum sýnatökustöðum og þau mæld á Orkustofnun í einu lagi þremur dögum síðar. Strax að niðursetningu lokinni var hafin sýnataka á u.þ.b. fjögurra tíma fresti í þrjá sólarhringa (4. til 7. janúar). Sýnum var sem fyrr safnað í brúnar 60 ml glerflöskur og geymdar í alveg þéttum kassa í myrkri. Sýnin voru send til Orkustofnunar í nokkrum áföngum þannig að unnt væri að greina þau innan fjögurra daga. Sýnum var síðan safnað tvisvar á dag í sex daga og lauk síðan þessari prófun.

**Tafla 6.** Sýnatökustaðir í lokaáfangafæringu í desember 1998-janúar 1999.

- |                                     |
|-------------------------------------|
| 10) Langivogur                      |
| 14) Grjótagjá-karlagjái             |
| 18) Bakki Mývatns rétt neðan Bjargs |
| 19) Hverfjallsgjá                   |
| 20) Strandavogur                    |
| 22) Garðslind                       |

### 6.3 Mælingar og helstu niðurstöður

Flúoresceinið var mælt á Orkustofnun með Perkin Elmer 204S Spectrophotometer eins og lýst er í kafla 4.3. Niðurstöður mælinga á sýnatökustöðunum sex á móti tíma frá niðurstöðunum eru sýndar á mynd 9. Efnið virðist koma fram mjög fljótt í Grjótagjá, eða strax á fyrsta sólarhring. Þar sjást nokkrir púlsar fyrstu tvo sólarhringana en styrkurinn er lágur. Hugsanlegt er að eitthvað hafi skilað sér af efninu í Garðslind og í Hverfjallsgjá en það er fremur óljóst. Mesta svörunin er í Grjótagjá, en þar nær hækkun í styrk þó ekki þreföldu grunnildi. Þessi niðurstaða styður það, sem prófun með kalíumjodíði benti til, að hluti affallsins berist með hröðum yfirborðsstraumum og að blöndun sé mikil. Jafnframt virðist flúorescein skila sér illa og því líklegt að það sé síð úr vatninu þótt í eitthvað minna mæli en rhódamínið. Í fyrstu prófunum var erfitt að meta líkur á því hvort litarefnin hefðu horfið vegna aðsogunar eða hvort óregla og hár bakgrunnur hefði komið í veg fyrir að þau kæmu fram í mælingum. Þegar niðurstöður frá kalíumjodíði sýndu mjög hraða svörun og endurheimtur fyrir hluta efnisins var talið ólíklegra að efnin hefðu horfið alveg vegna aðsogunar. En niðurstöður þessara prófana til að aðsogun eigi sér stað í talsverðum mæli.



Mynd 9. Niðurstöður mælinga á flúoresceini á sýnatökustöðunum sex á móti tíma frá niðurstöðu.

## 7. Túlkun á endurheimtu joðíðs

Af þeim þremur ferilprófunum sem fram fóru í Mývatnssveitinni á síðasta ári virðist helst eitthvað hægt að byggja á mælingunum á endurheimtu joðíðs til magnbundinna reikninga á endurheimtu. Greinilega er um nokkra endurheimtu þess á flestum sýnatökustaðanna, þó sýnatakan hafi verið allt of strjál fyrstu dagana (Hrefna Kristmannsdóttir o.fl., 1998).

Mynd 1 sýnir sýnatökustaðina í ferilprófununum og vísa númerin í töflu 7 hér á eftir. Mynd 10 (a-u) sýnir síðan mælda endurheimtu joðíðsins, sem sett var niður í Bjarnarflagi (stað III) um miðjan dag 16. september 1998. Þær mælingar hafa verið leiðréttar fyrir bakgrunnsstyrk á hverjum stað, sem ákvarðaður var sem lægsta mæligildið á hverjum stað. Myndirnar sýna vel að mælingarnar eru allt of strjálar fyrstu dagana, en þá virðist joðíðið vera að skila sér á flestum staðanna. Myndirnar sýna mælingar yfir u.þ.b. mánað-artímabil, nema mynd 11 sem sýnir mælingar úr Grjótagjá fram í febrúar í ár. Sú mynd sýnir að joðíðið virðist byrja að skila sér aftur í Grjótagjá um 3 1/2 mánuði eftir niðursetningu. Um það verður fjallað seinna. Annars virðist joðíðið skila sér í hæstum styrk við Hverfjall, í Helgavogi og við Bjarg (10-20 ppb).

Túlkun þessara mælinga fór fram á tvennan hátt: Annars vegar var endurheimta joðíðsins á hverjum stað reiknuð með því að tegra mynd 10 (a-u). Þannig fékkst reyndar stærðin  $e/q$  sem fall af tíma, þar sem  $e$  er endurheimtan (kg) og  $q$  er massastreymið á hverjum stað (kg/s), en það er að vísu óþekkt. Mynd 12 (a-u) sýna  $e/q$  fyrir alla sýnatökustaðina. Hins vegar var reynt að reikna meðalhraða grunnvatnsstraumsins frá Bjarnarflagi til sýnatökustaðanna, út frá áætluðum tíma hámarksstyrks á hverjum stað og vegalengd þarna á milli.

Niðurstöðurnar eru birtar í töflu 7. Þar er auk þess birtur mældur hiti vatns hvers staðar. Gögnin frá hverjum stað er í raun ekki hægt að túlka frekar, því ekki eru til upplýsingar um rennsli á hverjum stað ( $q$ ). Áætlaður rennslishraði, en hann er á bilinu 0,3 - 2,0 m/mín, virðist þó eðlilegur borið saman við þær afar takmörkuðu rennslismælingar sem til eru (Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigurbjarnason, 1983). Ekki virðist hægt að greina samband milli þátta eins og endurheimtu, hraða, fjarlægðar og hita. Helst virðist hægt að greina þau sambönd sem sýnd eru á myndum 13-14. Í fyrsta lagi beint samband milli hita og fjarlægðar frá Bjarnarflagi (mynd 13), sem þó er óháð ferilprófuninni. Þetta samband sýnir hvernig jarðhitavatnið kólnar er fjær dregur upptökum þess í Bjarnarflagi/Námafjalli. Vætanlega er kólnunin að hluta vegna blöndunar við kalt grunnvatn. Í öðru lagi virðist hraði grunnvatnsstreymisins vaxa með fjarlægð frá Bjarnarflagi (mynd 14). Þannig tengsl virðist undarleg, en skýringin er vætanlega sú að hraði kalda grunnvatnsstreymisins sé meiri en volga/heita hluta þess. Þetta samband sést betur á mynd 15.

**Tafla 7.** Niðurstöður túlkunar endurheimtu jodíðs. Upplýsingar um hita frá Halldóri Ármannssyni o.fl (1998).

Staður (nr.)	dagur	fjarl (km)	endurh./q (kg.s/kg)	toppur (dagur)	hraði (m/min)	hiti (°C)
Grjótagjá (14)	27	2,5	0,000462	4,5	0,39	47
Leynigjá (13)	27	3,0	0,00303	5,0	0,42	42
Hverfjall (19)	20	4,5	0,00397	3,0	1,0	6
Helgagjá (8)	19	7,0	0,000207	8,0	0,61	7
Garðslind (22)	19	11,5	0,00246	4,0	2,0	6
Syðrivogar (21)	19	10,0	0,000664	5,5	1,3	5
Strandavogur (20)	19	6,5	0,00140	3,0	1,5	7
Vogaflói (9)	19	5,0	0,000413	3,5	1,0	6
Langivogur (10)	19	4,0	0,00130	6,5	0,43	23
Helgavogur (11)	19	3,5	0,00476	3,0	0,81	26
Dælustöð (17)	19	3,5	0,000150	7,0	0,33	27
Bjarg (18)	27	3,0	0,00355	3,0	0,69	20
Egils-hola (7)	27	2,5	0,00199	4,5	0,39	31
Stóragjá (15)	27	2,5	0,00224	3,0	0,58	29

Einu áætlanirnar sem tiltækar eru um grunnvatnssrennslið í Mývatnssveit eru birtar af Jóni Ólafssyni (1979b og c). Þar er áætlað að grunnvatnssstreymið til Ytri-flóa sé  $7 \text{ m}^3/\text{s}$  að jafnaði, en  $21 \text{ m}^3/\text{s}$  til Syðri-flóa. Þessar tölur má nota til þess að áætla gróflega heildarmagn jodíðs sem streymt hafi út í Mývatn þennan tæpa mánuð sem mælingar fóru fram. Byggt er á eftirfarandi:

**Ytri-flói:** Meðalgildi endurheimtu ( $e/q$ ) fyrir Vogafloa, Langavog, Helgavog og Bjarg er  $\langle e/q \rangle = 0,0034 \text{ kg.s/kg}$  og meðalhraðinn fyrir þessa fjóra staði er  $\langle v \rangle = 0,73 \text{ m/mín} = 0,012 \text{ m/s}$ . Þá áætlum við að meðalrennsli grunnvatns um austurströnd Ytri-flóa sé um  $Q = 3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Syðri-flói:** Meðalgildi endurheimtu ( $e/q$ ) fyrir Garðslind, Syðrivoga og Strandavog er  $\langle e/q \rangle = 0,0015 \text{ kg.s/kg}$  og meðalhraðinn fyrir þessa þrjá staði er  $\langle v \rangle = 1,3 \text{ m/mín} = 0,022 \text{ m/s}$ . Þá áætlum við að meðalrennsli grunnvatns um austurströnd Ytri-flóa sé um  $Q = 7 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Til þess að meta magn jodíðs sem streymdi út í Mývatn notum við jöfnuna:

$$M = \langle e/q \rangle \rho_v Q$$

þar sem  $\rho_v$  er eðlismassi vatns  $1000 \text{ kg/s}$ . Því til viðbótar má nota jöfnuna:



$$A = \frac{Q}{\langle v \rangle}$$

til þess að meta samanlagt þverskurðarflatarmál þeirra rása sem grunnvatnið streymir eftir um austurhlið hvors hluta vatnsins. Þá fást niðurstöðurnar sem dregnar eru saman í töflu 8.

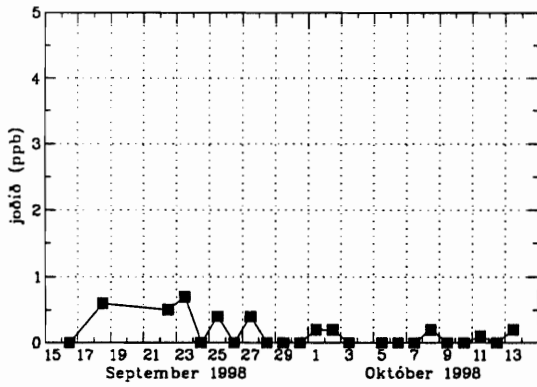
**Tafla 8.** Áætlanir um endurheimtu joðíðs í Mývatni á prófunartímanum.

	lengd strandar (km)	$\langle e/q \rangle$ (kg.s/kg)	$\langle v \rangle$ (m/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	M (kg)	A (m sup 2)
Ytri-flói	4	0,0025	0,012	3,5	8,8	290
Syðri-flói	6	0,00115	0,022	7,0	10,5	320
Samtals	10			10,5	19,3	610

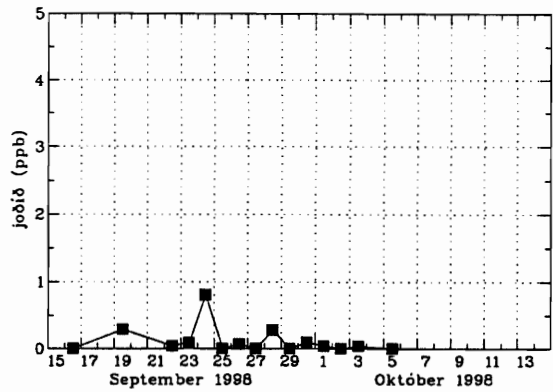
Samkvæmt niðurstöðum í töflu 8 ættu um 1/4 þeirra 76,6 kg af joðíði, sem niður fóru í Bjarnarflagi, að hafa skilað sér út í Mývatn. Þetta verður að teljast mjög sennileg tala, sem kemur skammtilega á óvart ef öll ónákvæmnin sem á bak við hana liggur er höfð í huga. Líkur eru á því að grunnvatnsstreymið út um austurströnd Mývatns sé meiri en gert er ráð fyrir í töflunni. Ef það er t.d. tvöfalt meira fæst að endurheimta joðíðsins sé 50%.

Niðurstöðurnar um samanlagt þverskurðarflatarmál (A) þeirra rása sem grunnvatnið streymir eftir inn um austurhlið vatnsins, þ.e. 600 m<sup>2</sup> á 10 km, verða einnig að teljast sennilegar einkum ef haft er í huga að það á fyrst og fremst við um þær rásir, sem mest rennslið er eftir. Það gæti einnig verið vanmetið eins og massi joðíðsins í töflunni.

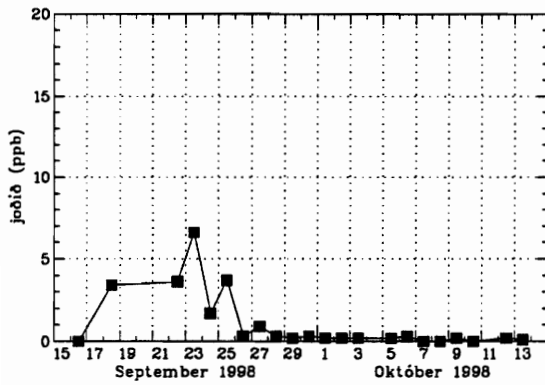
Afgangurinn af joðíðinu skilar sér svo væntnalega á mun lengri tíma með hægari hluta grunnvatnsstraumsins. Athygli vekur t.d. að mælingar úr Grjótagjá sýna að joðíð fer aftur að greinast þar um síðustu áramót. Hvaða löngu leið það hefur borist er erfitt að segja. Athyglisvert væri að mæla joðíðstyrk í sýnum úr lindum við vatnsbakkann yfir jafn langan tíma og í Grjótagjá.



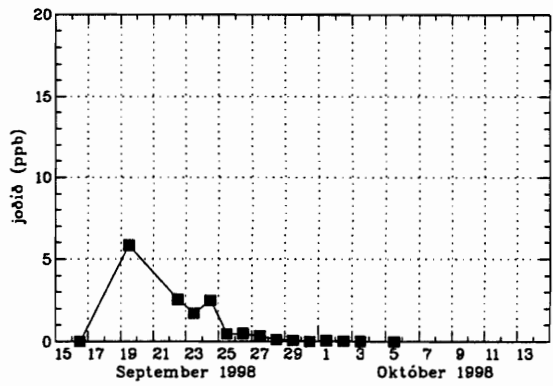
Mynd 10a. Leiðréttur styrkur í Grjótagjá.



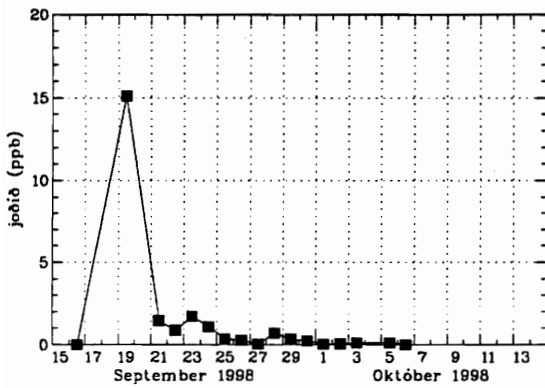
Mynd 10d. Leiðréttur styrkur í Helgagjá.



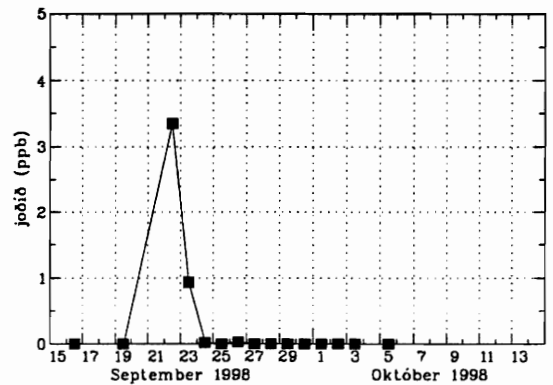
Mynd 10b. Leiðréttur styrkur í Leynigjá.



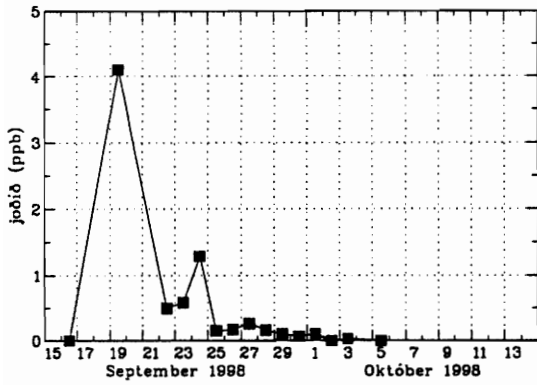
Mynd 10e. Leiðréttur styrkur í Garðslind.



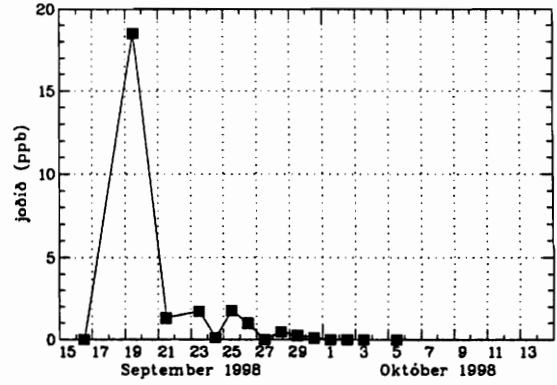
Mynd 10c. Leiðréttur styrkur við Hverfjall.



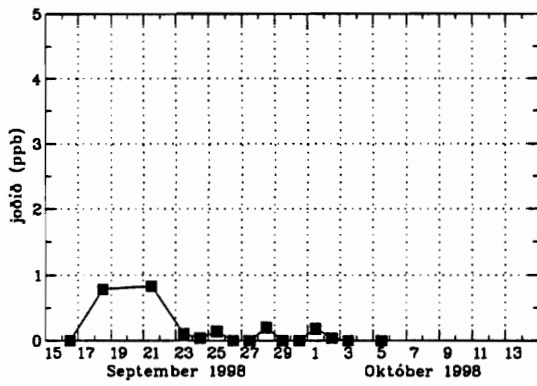
Mynd 10f. Leiðréttur styrkur í Syðrivogum.



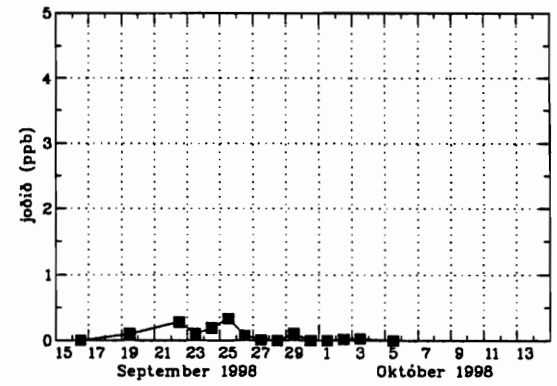
Mynd 10g. Leiðréttur styrkur í Strandavog.



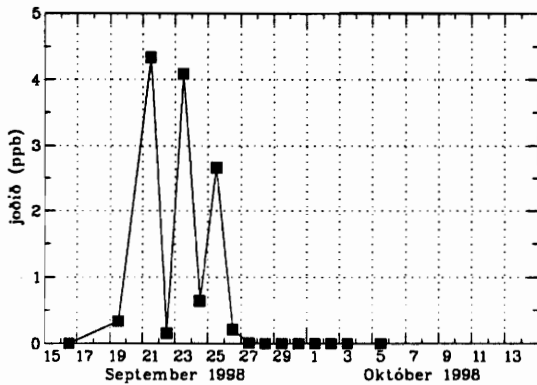
Mynd 10j. Leiðréttur styrkur í Helgavog.



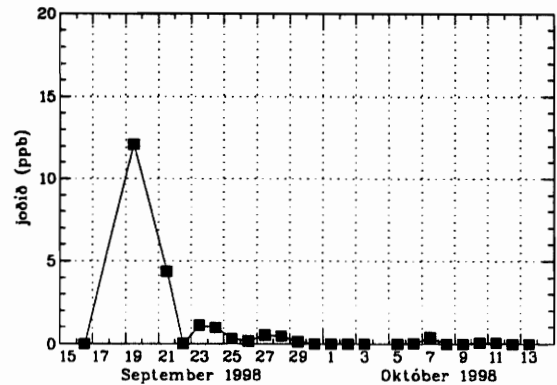
Mynd 10h. Leiðréttur styrkur í Vogaflióa.



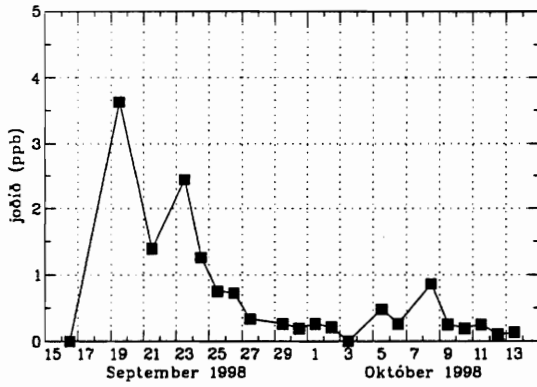
Mynd 10k. Leiðréttur styrkur í ðælustöð.



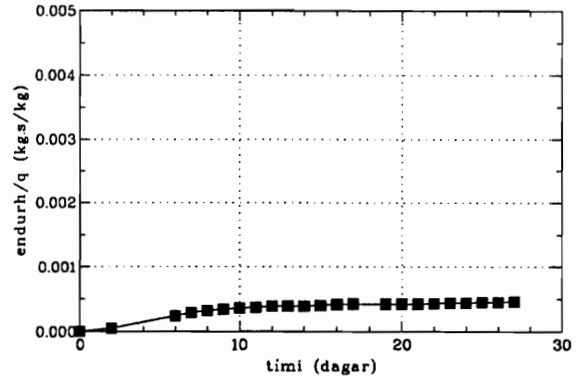
Mynd 10i. Leiðréttur styrkur í Langavog.



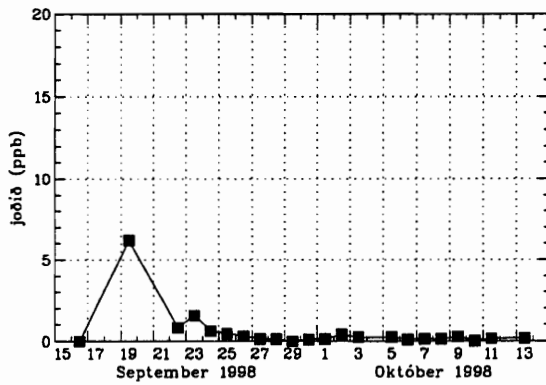
Mynd 10l. Leiðréttur styrkur við Bjarg.



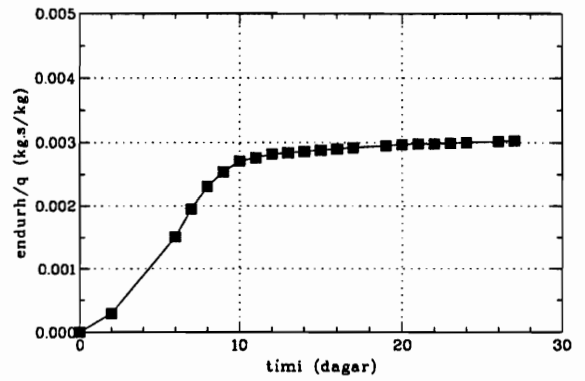
Mynd 10m. Leiðréttur styrkur í Egilsholu.



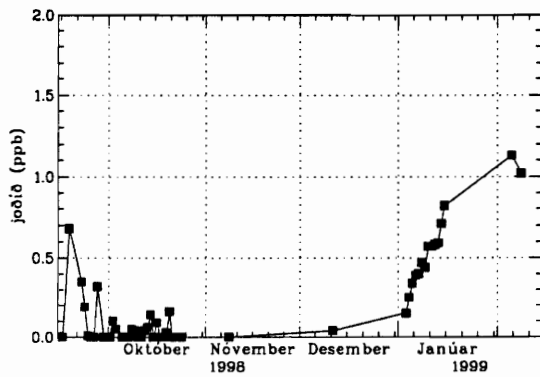
Mynd 12a. Endurheimta í Grjótagjá.



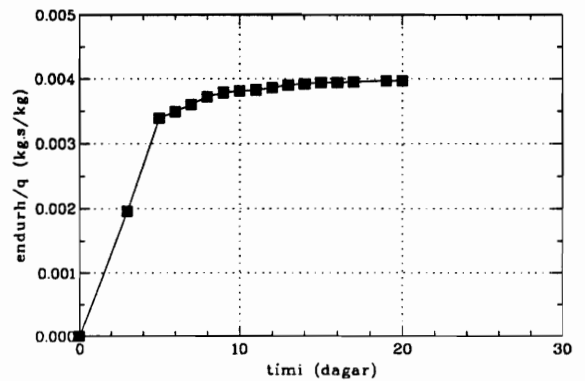
Mynd 10n. Leiðréttur styrkur í Stórugjá.



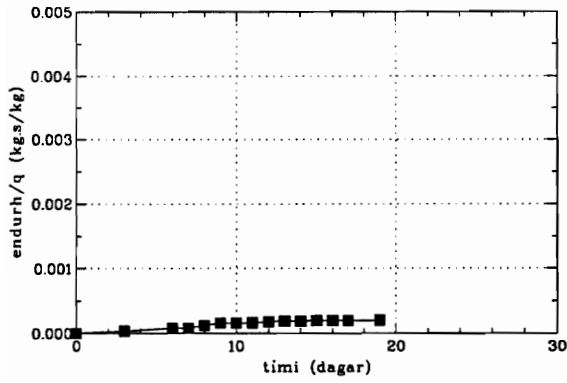
Mynd 12b. Endurheimta í Leynigjá.



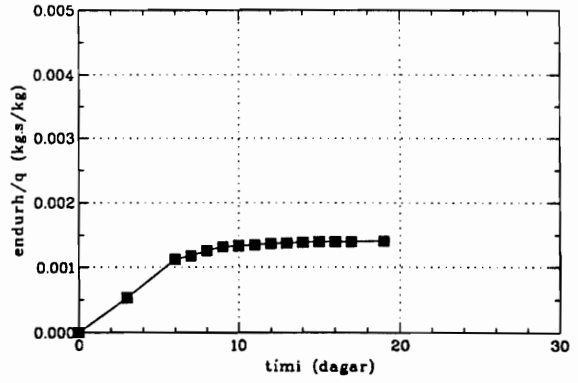
Mynd 11. Styrkur í Grjótagjá til feb. 1999.



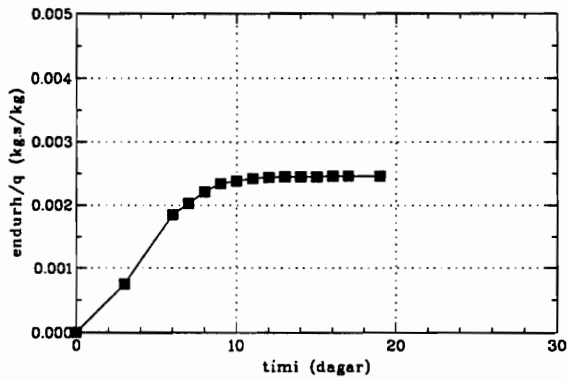
Mynd 12c. Endurheimta við Hverfjall.



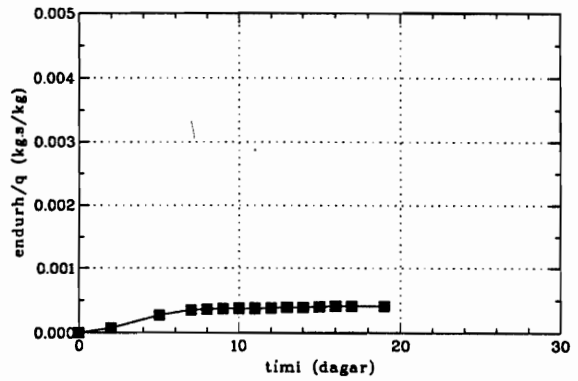
Mynd 12d. Endurheimta í Helgagjá.



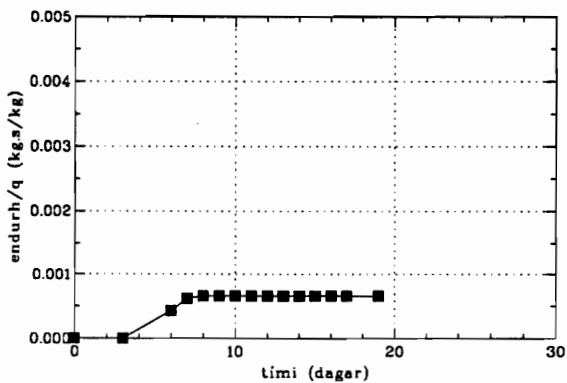
Mynd 12g. Endurheimta í Strandavogi.



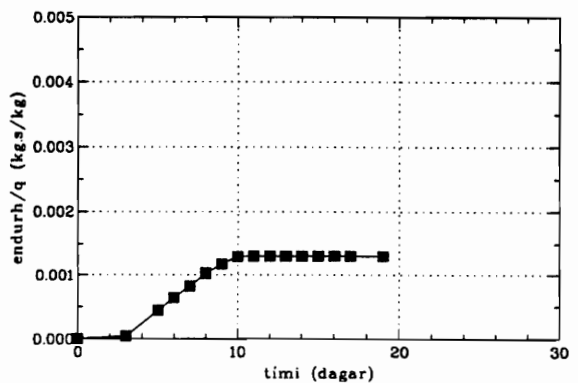
Mynd 12e. Endurheimta í Garðslind.



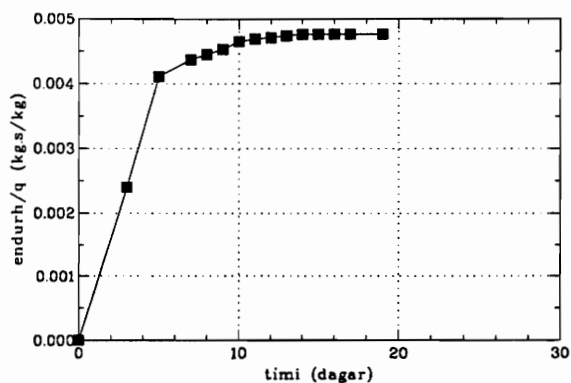
Mynd 12h. Endurheimta í Vogaflóa.



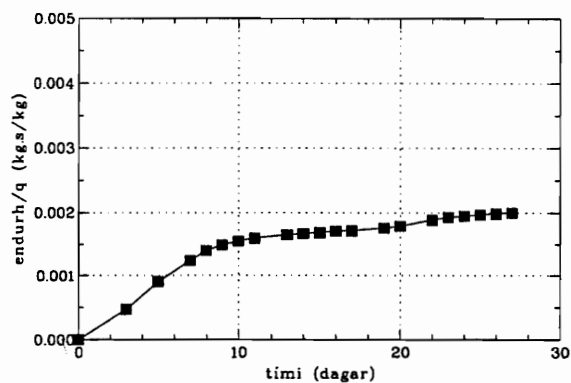
Mynd 12f. Endurheimta í Syðrivogum.



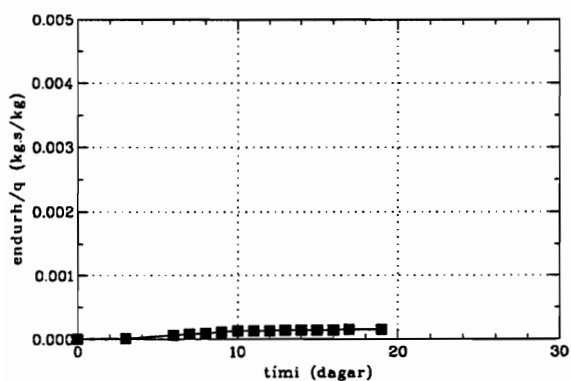
Mynd 12i. Endurheimta í Langavogi.



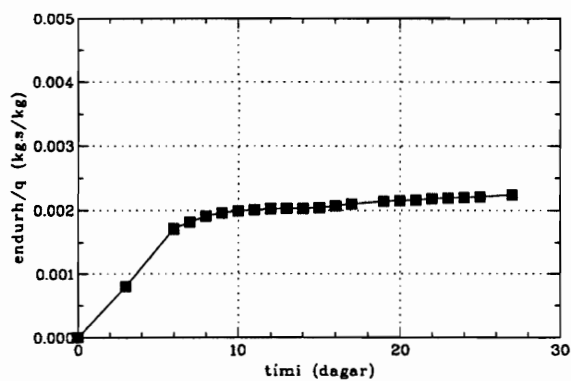
Mynd 12j. Endurheimta í Helgavogi.



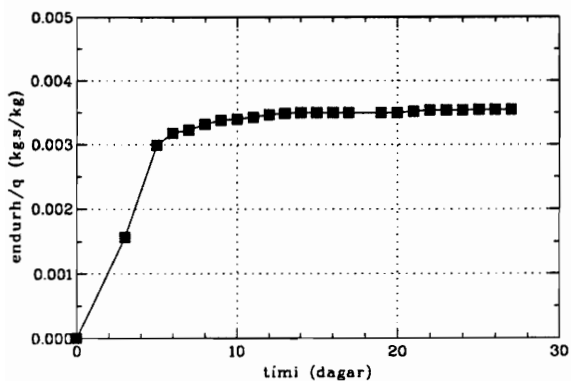
Mynd 12m. Endurheimta í Egilsholu.



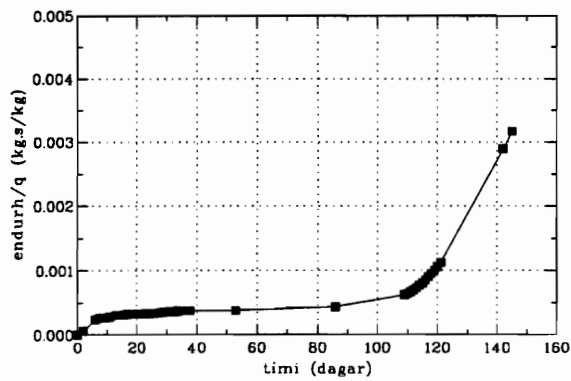
Mynd 12k. Endurheimta í dælustöð.



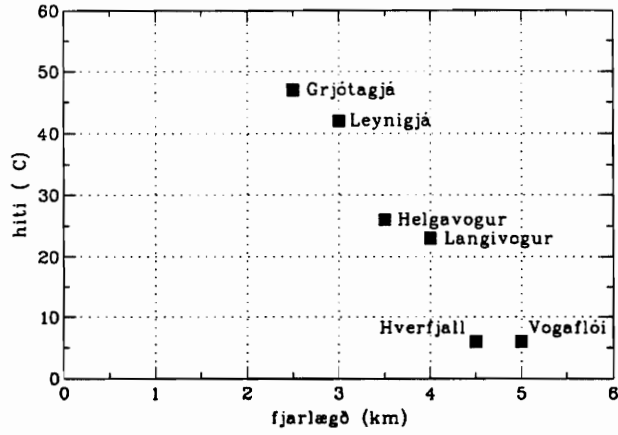
Mynd 12n. Endurheimta í Stórugjá.



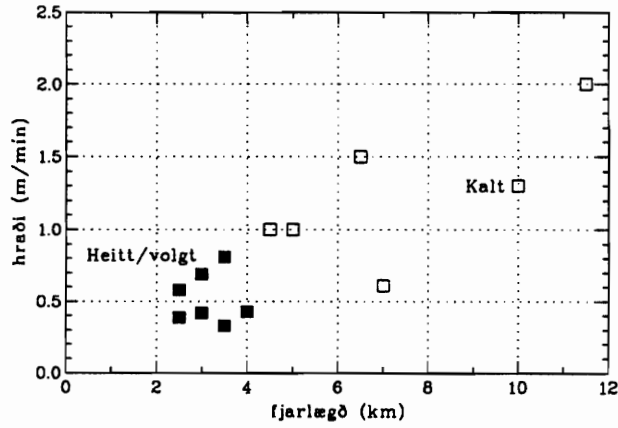
Mynd 12l. Endurheimta við Bjarg.



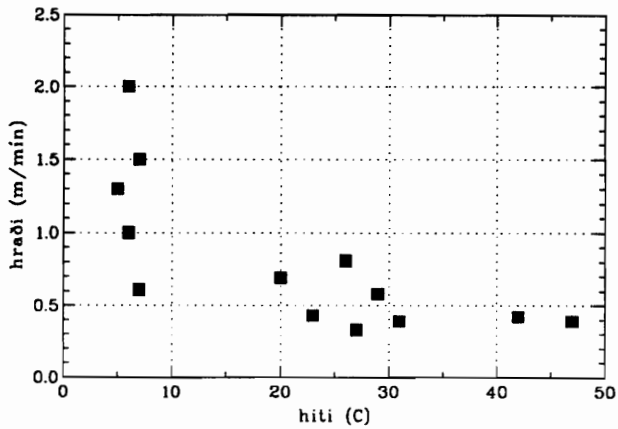
Mynd 12o. Endurheimta í Grjótagjá til feb. 1999.



Mynd 13. Samband hita á nokkrum sýnatökustöðum og fjarlægðar frá Bjarnarflagi.



Mynd 14. Samband áætlaðs hraða á sýnatökustöðum og fjarlægðar frá Bjarnarflagi.



Mynd 15. Samband áætlaðs hraða og hita á sýnatökustöðum.

## 8. Túlkun niðurstaðna

Tiltæk gögn frá ferilprófunum á Mývatnssvæðinu 1998 eru of takmörkuð til þess að leyfa nákvæma túlkun. Á það bæði við um mælingar á endurheimtu ferilefnanna og magnbundnar upplýsingar um grunnvatnsrennsli á svæðinu. Ónákvæmar áætlanir benda til þess að um fjórðungur þess joðíðs, sem sett var niður í affallslónið í Bjarnarflagi, hafi skilað sér út í Mývatn á u.þ.b. 1/2 mánuði, sem sýnir mikinn hraða grunnvatnsstreymis á svæðinu. Það er í samræmi við það sem talið hefur verið til þessa. Þá sýna niðurstöðurnar að ferilefnið dreifist mjög vel um grunnvatnskerfið allt. Sama mun væntanlega gilda um hugsanlega mengun í Bjarnarflagi.

Hvorugt flúrljómandi efnanna í fyrstu prófuninni skilaði sér á þeim mánuðum sem prófunin stóð yfir. Fyrirfram var talið fremur óvíst að flúorescein sem sett var niður í affallssvelginn í Búrfellshrauni til að kanna rennislíleiðir affallsvatns frá Kröflu kæmi yfirleitt fram í fyrirhuguðum athugunarstöðum. Þótt grunnvatnið hugsanlega rynni til vesturs þá eru ekki nein opin vatnsból til í grennd við niðursetningarstaðinn. Því hafði verið lagt til að fyrir þá prófun yrðu boraðar grannar borholur niður í grunnvatnsborð á 2-3 stöðum, sunnan við Leirhnjúk og austan og sunnan við Hverfjall. Það reyndist ekki unnt að gera. Eini athugunarstaðurinn á mögulegri leið grunnvatnsins til vesturs áður en komið er í lindir Mývatns er Helgagjá. Þegar engin merki sáust um efnið í Helgagjá né öðrum enn fjarlægari stöðum var lagt til að bíða með frekari prófanir. Alls er óvíst hvort efnið hefur yfirleitt borist til vesturs og hvort grunnvatnið rennur þangað.

Ferilprófun með rhódamíni á Mývatnssvæðinu gaf heldur enga niðurstöðu, þar sem ekki mældust neinar endurheimtur.

Að öllu eðlilegu hefði það rhódamín sem sett var niður í Bjarnarflag átt að skila sér á einhvern athugunarstaðanna. Ástæður þess að svo varð ekki voru taldar tvíþættar. Bæði rhódamín og flúorescein aðsogast auðveldlega í jarðveg, einkum þó rhódamínið. Kísill í Bjarnarflagsslóni var talinn geta haldið eftir einhverju af efninu, en ólíklegt að það yrði í miklum mæli. Ekki var talið að mikil hætta á því að í hraununum væri mikið um leir eða jarðveg, sem gæti síað efnin út úr vatninu. Kísilþörungur greindust í grunnvatni úr borholum í Bjarnarflagi þegar um 1978. Holurnar hafa síðan verið ónýttar og þar af leiðandi ekki verið unnt að fylgjast þar með vatni. Fosfat, sem er í affalli Kísiliðjunnar, skilar sér ekki nema að hluta út í Mývatn og hefur sú skýring verið sett fram að það geti hafa aðsogist kísilgúr í affalli verksmiðjunnar (Jón Ólafsson, 1979a).

Líklegt er að allmikil uppsöfnun á kísilgúr hafi orðið í hrauninu umhverfis Bjarnarflag. Frá því að fyrri ferilprófanir voru gerðar hefur verið losað mikið affall frá Kísiliðjunni og gæti hafa orðið veruleg uppsöfnun á kísilgúr í hrauninu. Þá var sett niður rúmlega tíu sinnum minna magn ferilefnis en í sumar. Í rannsóknarstofuþrófunum Orkustofnunar á aðsogi rhódamíns í kísilríku Svartsengisvatni (Anna E. Ólafsdóttir, 1984) tók það a.m.k. nokkra daga að hverfa úr lausn. Miðað við það og niðurstöður í prófun með kalíumjoðíði og eldri prófanir með flúoresceini hefði einhver hluti þess átt að skila sér í nálægum athugunarstöðum. Vera má þó að kísilgúrin sé betri sía en kísilríkt Svartsengisvatn, en þetta mál er ekki að fullu skýrt.



Mismunandi niðurstöður virðast fást úr ferilprófunum á Mývatnssvæðinu nú og þeim sem gerðar voru 1981 og 1982, en þess ber að geta að þessar prófanir eru ekki sambærilegar. Í ferilprófun 1981 var efnið sett niður í hraunið við Varmholtsgjá (I á mynd 1), 1982 var það sett niður norðan við þrær Kísiliðju (II á mynd 1) og nú í sumar var það sett niður vestan við affallslón frá skiljustöðinni í Bjarnarflagi (III á mynd 1). Í fyrri ferilprófunum var tilgangurinn að ákveða leið affalls frá Kísiliðjunni, en í þeim síðari að ákveða leið affallsvatns frá lóninu. Vera má að svelgurinn frá affallslóninu eigi greiðari leið út í opnar gjár og rennur, en affall bæði frá leiðslu og þróm Kísiliðju gæti borist dýpra í grunnvatnskerfið. Séu gögn frá eldri ferilprófunum skoðaðar er reyndar ljóst að túlkun á niðurstöðum úr a.m.k. þeirri síðari getur orkað tvímælis. Flúoresceinið kom þó óumdeilanlega fram í næstu athugunarstöðum í báðum eldri ferilprófununum. Það magn sem þá var sett niður var tífalt minna en tilsvareandi rhódamínamagn og magn flúoresceins í síðustu ferilprófuninni. Ekki er unnt að meta endurheimtur magnbundið í fyrri ferilprófununum, en ljóst er að það skilaði sér betur en í prófunum 1998 og 1999, þegar ekkert rhódamín og mjög lítið flúorescein skilaði sér.

Ekkert bendir til að í eldri prófunum hafi ferilefnið borist álíka hratt um og prófunin 1998 með kalíumjoðiðinu bendir til. Sú tilgáta að allt rhódamínið hafi aðsogast kísilgúr og því ekki komið fram virðist ólíkleg í ljósi niðurstaðna frá ferilprófuninni með kalíumjoðiði um að rennslið frá allallslæknum sé nánast eins hratt og í gjánum. Hins vegar gæti truflun á mælingum í Kröflu og strjalar viðmiðunarmælingar hafa gert það að álíka lítill toppur og fram kom af flúoresceini í síðustu prófuninni hafi ekki sést. Jafnframt er líklegt að aðsog rhódamínsins sé meira en flúoresceins og þar sem virkt magn efnanna var mjög ámóta í prófununum sumarið 1998 og haustið 1999 hefði toppur rhódamínsins getað verið enn lægri.

Við túlkun niðurstaðna hefði verið æskilegt að hafa betri upplýsingar um rennslishraða grunnvatns á svæðinu. Möguleiki er að komast að til að mæla straumhraða beint í sumum gjánum. Nokkrar slíkar mælingar á straumhraða voru gerðar árið 1981, en það eru einu mælingarnar. Mjög æskilegt væri að fara í allar opnar gjár á svæðinu og mæla straumhraða og straumstefnu í þeim á mismunandi dýpi og jafnframt reyna að mæla straumhraða í þeim lindum þar sem slíkt er mögulegt. Þessar mælingar verði gerðar í samvinnu við Vatnamælingar Orkustofnunar.

Niðurstöður ferilprófananna benda eindregið til að ekki sé mögulegt að nota litarefni af svipaðri gerð og rhódamín og flúorescein sem ferilefni til að fá magnbundna endurheimtu, a.m.k. ekki á Bjarnarflagssvæðinu. Til að fá betri upplýsingar um rennslishraða og blöndun í grunnvatnskerfinu á Námafjallssvæðinu virðist þó augljóslega þurfa fleiri slíkar prófanir í tengslum við beinar mælingar. Samkvæmt ofangreindu er lagt til að fjórða ferilprófunin í Bjarnarflagi verði framkvæmd fljótlega annaðhvort með endurtekinni niðurstöðum kalíumjoðis eða með því að setja niður alkalíbrómíð. Af kalíumjoðiði er lagt til að sett verði niður 150-200 kg, en af alkalíbrómíði þarf talsvert meira, 500-800 kg, þar sem mælinæmni er lægri fyrir brómíð en joðið og bakgrunnur í grunnvatninu hærri. Af þessum sökum er æskilegra að nota joðiðið. Eins og fram kom í kafla 3 hér að framan er verð svipað á því magni sem niður fer af hvoru fyrir sig. Leggja þarf áherslu á tíðari sýnatöku fyrstu dagana í þessari ferilprófun og er lagt til að hún verði með svipaðri tíðni og í síðustu ferilprófun með flúoresceininu. Tekin verði sýni úr öllum sömu stöðum

og í fyrstu ferilprófununum. Eftir fyrstu 3-5 dagana verði dregið úr sýnatökutíðni niður í 1-2 á dag og eftir 3 vikur verði einungis tekin sýni tvisvar í viku. Þeirri sýnatöku verði hins vegar haldið áfram í 3-4 mánuði a.m.k. í nokkrum völdum sýnatökustöðum. Varðandi sýnatökustað þá er væntanlega eðlilegt að halda sig við niðurfalssvelg Bjarnarflag-slóns, þar sem það er aðalförgunarstaður affallsvatns á svæðinu. Ætti að setja efnið niður nær áætluðum nýjum virkjunarstað, t.d. í Krummagjármisgengið eða við Jarðbaðshóla, þá þyrfti að farga þar vatni tímabundið eða a.m.k. dæla á eftir ferilefninu í einhvern tíma til að skola því niður í grunnvatnskerfið.

Ekki virðist ástæða til að gera fleiri ferilprófanir með affalli frá Búrfellshrauni fyrr en boraðar hafa verið þær grunnvatnsholur sem lagðar hafa verið til vestan og sunnan við förgunarsvæðið. Mjög æskilegt væri að bora þær holur sem fyrst og gera síðan nýja ferilprófun þar til að ganga úr skugga um hvort og hversu mikið af affallinu skilar sér til vesturs og til Mývatns.

Að loknum nýjum ferilprófunum og rennslismælingum á svæðinu er brýnt að huga að því að setja upp nákvæmt reiknilíkan af grunnvatnskerfinu, sem yrði grundvöllur að eftirliti með svæðinu í framtíðinni. Gögn frá vinnslurannsóknum á jarðhitasvæðunum, efnarannsóknnum og grunnvatnsathugunum í framtíðinni yrðu jafnframt notuð til að gera líkanið nákvæmara og treysta stoðir þess.

## 9. Meginniðurstöður

Tiltæk gögn frá ferilprófunum á Mývatnssvæðinu 1998 eru of takmörkuð til þess að leyfa nákvæma túlkun. Ástæða þess er bæði skortur á magnbundnum upplýsingum um grunnvatnsrennsli á svæðinu og lélegar heimtur ferilefna.

Ónákvæmar áætlanir benda til þess að um fjórðungur þess jöðíðs, sem sett var niður í affallslónið í Bjarnarflagi hafi skilað sér út í Mývatn á u.þ.b. 1/2 mánuði, sem sýnir mikinn hraða grunnvatnsstreymis á svæðinu.

Svo virðist sem grunnvatnsstreymi svæðisins skiptist í kaldan og volgan/heitan hluta og er hraði þess kalda mun meiri en hins.

Þá sýna niðurstöðurnar að ferilefnið dreifist mjög vel um grunnvatnskerfið allt. Sama mun væntanlega gilda um áhrif hugsanlegs affallsvatns í Bjarnarflagi.

Ferilprófun með rhódamíni á Mývatnssvæðinu gaf litlar niðurstöðu, þar sem ekki mældust neinar endurheimtur. Truflun á mælingum í Kröflu og strjálar viðmiðunarmælingar gætu hugsanlega hafa valdið því að álíka lítill toppur og fram kom af flúoresceini í síðustu prófuninni hefði ekki sést. Önnur ástæða þess að rhódamín kom ekki fram er talin aðsog kísils og kísilþörungna frá affalli Kísilgúrverksmiðjunnar, en ekki er ólíklegt að allmikil uppsöfnun á kísilgúr hafi átt sér stað í hrauninu umhverfis Bjarnarflag.

Flúorescein í síðustu prófuninni skilaði sér í litlum mæli á næstu athugunarstaði. Líklegt er að þar skipti aðsog einnig nokkru máli.

Verulega mismunandi niðurstöður virðast fást úr ferilprófunum á Mývatnssvæðinu nú og þeim sem gerðar voru 1981 og 1982. Þessar prófanir eru ekki beint sambærilegar og ekki er unnt að meta endurheimtur magnbundið í fyrri ferilprófununum. Ljóst er þó að ferilefnið skilaði sér betur þá en í prófunum 1998 og 1999.

Prófanir sumarsins gáfu engar mælanlegar niðurstöður varðandi rennsli affallsvatns frá Kröflu. Þótt grunnvatnið hugsanlega rynni til vesturs þá eru ekki nein opin vatnsból til í grennd við niðursetningarstaðinn. Lagt hafði verið til að fyrir þá prófun að bora grannar borholur niður í grunnvatnsborð á 2-3 stöðum. Stóð til að bora holurnar s.l. haust, en hætta varð við það vegna veðurfars í október.

Niðurstöður sýna að mörgum atriðum er enn ósvarað varðandi leið jarðhitaaffalls til Mývatns og nauðsynlegt að gera frekari athuganir til að fá ítarlegri niðurstöður um rennsliferli grunnvatns frá Bjarnarflagssvæðinu.

## 10. Tillögur

Til þess að öðlast betri þekkingu á grunnvatnsstreymi í Mývatnssveit er lagt til að eftirfarandi verði rannsakað:

1. Gerðar verði ítarlegar mælingar á grunnvatnsstreymi í Mývatnssveit í samvinnu við Vatnamælingar Orkustofnunar.
2. Fjórða ferilprófunin verði gerð, t.d. með endurtekinni niðursetningu kalíumjodíðs (100-200 kg). Þá þarf að leggja áherslu á tíða sýnatöku fyrstu dagana og nákvæmar styrkmælingar.
3. Huga þarf að því hvort ekki væri rétt að setja upp nákvæmt reiknilíkan af grunnvatnskerfinu. Gögn úr 1 og 2 væru þó forsenda þess að það væri hægt, auk fyrirliggjandi gagna um efnainnihald og vatnshita.
4. Lagt er til að boraðar verði nokkrar grunnar borholur sunnan Námafalls og Hverfjalls til að fá betri upplýsingar um grunnvatnsborð.
5. Gerð verði ferilprófun að loknum borunum með því að setja niður ferilefni niður í niðurfallssvelginn frá læknum Búrfellshrauni til að ganga úr skugga um hvort og hversu mikið af affallinu skilar sér til vesturs og til Mývatns.

## 11. Heimildir

- Anna E. Ólafsdóttir, 1984. Könnun áhrifa Svartsengisvatns á rhodamin W.T. Orkustofnun greinargerð, AEÓ-84/01, 9 s.
- Arnþór Garðarsson og Árni Einarsson (ritstj.) 1991. Náttúra Mývatns. Hið íslenska náttúrufræðifélag, Reykjavík, 372 s.
- Gaspar, E., 1987. Modern Trends in tracer hydrology, vol 1. CRC Press, Inc. Boca Raton, Florida, 145 s.
- Guðni Axelsson, 1999. Ferilprófanir í Mývatnssveit. Túlkun á endurheimtu jodíðs. Orkustofnun, greinargerð, GAx-99/02, 9 s.
- Halldór Ármannsson, Hrefna Kristmannsdóttir og Magnús Ólafsson, 1998. Krafla-Námafjall. Áhrif eldvirkni á grunnvatn. Samstarfsverk Orkustofnunar og Landsvirkjunar. OS-98066, 33 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1998a. Áætlun um ferilprófun sumarið 1998 í grunnvatnskerfi Mývatnssvæðis. Greinargerð HK-98/03, 4 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1998b. Áætlun um ferilprófun sumarið 1998 í grunnvatnskerfi Mývatnssvæðis. Greinargerð HK-98/04, 4 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, 1998c. Framhald ferilprófana á Kröflu-Námafjallssvæði. Greinargerð HK-98/05, 3 s.
- Halldór Ármannsson, Hrefna Kristmannsdóttir og Magnús Ólafsson, 1998. Krafla-Námafjall. Áhrif eldvirkni á grunnvatn. Orkustofnun, OS-98066, 33 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir, Steinunn Hauksdóttir og Guðni Axelsson, 1998. Frumniðurstöður ferilprófunar með kalíum-jodíði á Kröflu-Námafjallssvæðiog tillögur um lokaáfanga prófana 1998. Orkustofnun, greinargerð HK/StH/GAx-98/06, 8 s.
- Iðnaðarráðuneytið, 1992. Könnun á áhrifum kísilgúrnáms á setflutninga í Mývatni og mikilvægi þeirra fyrir lífríki vatnsins. Rannsóknaráætlun 1992-1995. Mars 1992, 137 s.
- Jón Benjamínsson, 1984. Kenniefni. Um notkun flúrefnanna rhódamíns WT og flúoresceins við ferlunar- og streymisathuganir. OS-84076/JHD-14, 44 s.
- Jón Ólafsson, 1979a. Könnun á aukningu fosfórs og köfnunarefnis í jarðvatni við Mývatn. Náttúruverndarráð, Fjölrit nr. 5, 48-58.
- Jón Ólafsson, 1979b. Physical characteristics of Lake Mývatn and River Laxá. OKIOS, 32, 38-66.
- Jón Ólafsson, 1979c. Chemical characteristics of Lake Mývatn and River Laxá. OKIOS, 32, 82-112.
- Pétur M. Jónasson (ed.), 1979. Lake Mývatn. Ecology of eutropic, subarctic Lake Mývatn and the river Laxá. The Icelandic Literature Society in Copenhagen, 308 s.

- Steinunn Hauksdóttir, 1998. Greiningar á ferilefnum á Kröflu-Námafjallssvæði. Greinargerð StH-98/02.
- Steinunn Hauksdóttir og Hrefna Kristmannsdóttir, 1999. Samanburðarmælingar á Rhodamin WT og Na-flúorescein með Turner 111 fluoromæli. Ferilprófun í Mývatnssveit. Greinargerð StH/HK-99/01. 30 s.
- Umhverfissráðuneytið, 1993a. Mývatnsrannsóknir. Greinargerð um niðurstöður ársins 1992. Mars 1993, 27 s.
- Umhverfissráðuneytið, 1993b. Mývatnsrannsóknir. Tillaga að rannsóknaráætlun fyrir 1993-1995. Maí 1993, 34 s.
- Vatnaskil, 1991. Straumar í Mývatni. Unnið fyrir sérfræðinganefnd um Mývatnsrannsóknir. Apríl 1991, 94 s.
- Vatnaskil, 1993. Mývatn. Lake circulation and sediment transport. Ministry for the Environment. project management team for research on Lake Mývatn. 75 s.
- Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson, 1983. Kísiliðjan við Mývatn. Grunnvatnsrannsóknir. Orkustofnun, OS-83118/VOD-10, 41 s.

## VIÐAUKI 1

### Sýnatöku- og niðursetningarstaðir í Mývatnssveit.

Staðsetning mæld með Geoexplorer II og skrár "eftirá-leiðréttar" ( Hnathnit er WGS-84)

Nr.	Staður	Punktur	Breidd	Staðalfrávik	Lengd	Staðalfrávik	Hæð m y.s.
1	Brunadæluhús í Kröflu, Sandabotnalindir	103	65°42'10,706'	0,601	16°46'24,6 29"	0,979	468
2	AE-01, Gamla kaldavatnsholan	135	65°41'40,208'	0,426	16°46'27,5 54"	0,480	457
3	Hlíðardalslækur v/Skarðssel	284	65°40'58,223'	0,351	16°46'23,3 43"	0,419	393
4	Varmaskiptastöð í Bjarnarflagi, Austaraselslindir	153	65°38'34,207'	0,738	16°50'27,3 09"	0,713	357
5	AB-02 í Búrfellshrauni	136	65°37'54,157'	0,578	16°46'26,2 91"	0,427	349
6	Hlíðardalslækur v/AB-02	114	65°37'51,651'	0,290	16°46'23,0 14"	0,282	349
7	AF-01 "Egilshola"	143	65°38'25,216'	0,837	16°54'23,4 20"	0,294	291
8	Helgagjá	152	65°34'44,560'	0,498	16°52'21,9 33"	0,708	284
9	Vogaflói	144	65°36'40,490'	0,317	16°55'13,9 22"	0,881	279
10	Langivogur	117	65°37'00,953'	0,732	16°55'00,0 11"	0,155	282
11	Helgavogur	210	65°38'01,360'	0,595	16°55'21,1 72"	0,437	279
12	N-Helgavogar	126	65°38'09,455'	0,889	16°55'25,4 27"	1,837	277
13	Vogagjá (Leynigjá)	153	65°37'08,410'	0,444	16°53'22,4 64"	1,331	292
14	Grjótagjá	103	65°37'35,020'	0,601	16°52'58,7 28"	0,287	287
15	Stóragjá	154	65°38'18,037'	0,711	16°54'35,3 41"	0,446	288
16	Glerhallarvatn	106	65°38'27,310'	0,254	16°50'42,3 54"	0,296	320
17	Dælustöð Kísiliðjunnar	127	65°38'08,707'	0,520	16°55'30,3 32"	0,539	281
18	Bjarg/Eldá	126	65°38'25,186'	0,624	16°54'54,7 81"	0,529	279
19	Hverfjallsgjá	204	65°36'22,005'	0,474	16°53'37,6 86"	0,608	283
20	Strandarvogur	133	65°35'43,184'	0,471	16°56'01,0 81"	0,607	277
21	Grjótavogur	301	65°33'46,464'	0,481	16°56'38,2 61"	0,134	280
22	Garðslind	99	65°33'09,362'	0,682	16°58'08,5 33"	0,677	279
23	Svelgur í Búrfellshrauni	124	65°37'23,555'	0,224	16°46'39,1 95"	0,199	344
24	Svelgur í Bjarnarflagi, stök mæling, ekki leiðrétt	1	65°38'25,605 "		16°51'04,2 73"		320

