



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

Jarðhitakerfið í Námafjalli

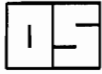
Efnafræðileg úttekt

Samvinnuverkefni Landsvirkjunar og Orkustofnunar

Halldór Ármannsson

OS-93053/JHD-29 B

Október 1993



ORKUSTOFNUN
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 720 104

Jarðhitakerfið í Námafjalli

Efnafræðileg úttekt

Samvinnuverkefni Landsvirkjunar og Orkustofnunar

Halldór Ármannsson

OS-93053/JHD-29 B

Október 1993

EFNISYFIRLIT

1. INNGANGUR	5
2. ATHUGANIR Á GUFUAUGUM	5
3. EFNASTYRKUR BORHOLURENNIS	7
4. EFNAHITI	8
5. ÚTFELLINGAHÆTTA	9
6. UPPRUNI	10
7. HELSTU NIÐURSTÖÐUR	11
8. TILLÖGUR UM FREKARI AÐGERÐIR	11
9. HEIMILDIR	23

MYNDASKRÁ

1. Gashiti gufu úr gufuaugum og borholum í Námafjalli 1950-1982	25
2. Breyting á djúphita í holu B-10	27
3. Námafjall. Leysnimargfeldi kalsíts við suðu vökva úr þremur holum (B-4, B-11 og B-12) í 100°C	28
4. Kísilvísir (log Q/K) fyrir sýni frá 1992 úr holum B-04, B-11 og B-12; ásamt blöndu af skiljuvatni og þéttivatni í mismunandi hlutföllum reiknað fyrir sýni úr B-12 frá 1989	29
5. Hlutföll tvívetnis og súrefnis-18 samsætna í vökva úr holum og uppsprettum í Námafjalli	30

TÖFLUSKRÁ

1. Gashiti (í °C) reiknaður á fernen hátt fyrir sýni sem Baldur Líndal tók saman á árunum 1950-1952, og sýni Stefáns Arnórssonar og Harðar Svavarssonar (1985)	12
2. Meðaltöl gashita í vesturhluta (Bjarnarflagi) og austurhluta (Hverarönd) Námafjallssvæðisins	13
3. Gashiti reiknaður frá niðurstöðum efnagreininga nokkurra sýna úr borholum í Bjarnarflagi 1973-1992	14
4. Námafjall. Holur B-1 - 12. Dýpi hola, æðar, hitastig innstreymis og hámarkshitastig fyrir og eftir umbrot	15
5. Efnasamsetning djúpvatns í holum B-4, B-11 og B-12 frá því snemma á blásturstíma holanna og árið 1992	16
6. Efnasamsetning djúpgufu í holum B-11 og B-12 frá því snemma á blásturstíma og árið 1992	16
7. Gas í gufu við 9,4 bar a (án andrúmsloftsgasa, N ₂ , O ₂ , Ar)	17
8. Námafjall. Styrkur As og Hg í djúpvatni í holum 6 og 10 árin 1976 og 1977 ásamt gasstyrk á sama tíma,	18
9. Árlegt streymi koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis (tonn/ár) til andrúmslofts frá Námafjallssvæðinu við núverandi vinnslu	18
10. Holur B-11, B-12 og B-4. Efnasamsetning skiljuvatns og gufu reiknuð við 9,4 bar abs.	19
11. Holur B-4, B-11 og B-12. Efnasamsetning vatns og gufu reiknuð við 1 bar a	19
12. Efnahiti reiknaður fyrir nokkur sýni úr borholum í Námafjalli 1964-1992	20
13. Hitastig og þrýstingur ópalmettunar fyrir nokkur sýni úr holum B-4, B-10 og B-12	21
14. Blöndunarhlutföll og hitastig fyrir blöndun vatns og þéttivatns úr holu B-12 (Sýni 895001)	21
15. Námafjall. Niðurstöður $\delta^2\text{H}$ og $\delta^{18}\text{O}$ ákvarðana á sýnum úr háhitaholum, grunnum holum og uppsprettum (‰ SMOW)	22

1. INNGANGUR

Skýrsla þessi er hluti af samvinnuverkefni Orkustofnunar og nokkurra fyrirtækja í orkuiðnaði sem nefnist "Jarðhiti til raforkuvinnslu". Vinnan að baki skýrslunni fellur undir þann lið samvinnuverkefnisins sem kallast "Hagkvæmniathugun í Bjarnarflagi" með verknúmer 720-104.

Boranir í Bjarnarflagi hófust árið 1963 með borun hola 1 og 2. Næstu árin voru þar töluverðar framkvæmdir við borun nýrra hola, hreinsanir og dýpkun eldri hola. Árið 1970 var búið að bora 9 holur á svæðinu, en þá varð hlé á borunum fram til 1975 er hola 10 var boruð. Umbrot hófust um mitt sama ár með aukningu í skjálftavirkni í sprungukerfinu sem nær frá sunnanverðri Mývatnssveit um Bjarnarflag og Leirhnjúk og þaðan um Gjástykki norður í Kelduhverfi. Miðja mestu virkni var nálægt Leirhnjúk og varð lítið eldgos norðan hans 20. desember 1975 og er það talið marka upphaf Kröfluelda. Umbrotavirknin einkenndist aðallega af kvikuhlaupum með tilheyrandi höggum á sprungum og misgengjum. Oftast fór kvikan eftir sprungukerfinu norður í Gjástykki, en nokkur hlaup urðu til suðurs. Alls hafa kvikuhlaupin orðið 21 og í níu skipti varð eldur uppi samfara þeim, síðast í september 1984 (Axel Björnsson o.fl. 1985). Sprungukerfið við Bjarnarflag sem var virkt í umbrotunum 1975-1984 afmarkast af Grjótagjármisgenginu að vestan og Krummaskarðsmisgenginu að austan (mynd 1). Árið 1977 gengu tvö kvikuhlaup suður sprungukerfið og ullu töluverðri hreyfingu á sprungum við Bjarnarflag. Við síðara hlaupið, sem varð í september það ár, komu fram skemmdir á flestum borholum í Bjarnarflagi, og meðal annars gaus hola 4 þá gjalli. Síðustu tvær holurnar (11 og 12), sem borðar voru í Bjarnarflag á árunum 1979 og 1980, voru því staðsettar austan við virka sprungukerfið.

Í þessari skýrslu verður farið yfir rannsóknir á efnafræðilegum eiginleikum jarðhitavökva í Námafjalli og reynt að gefa hugmynd um vinnslueiginleika vatns og gufu.

2. ATHUGANIR Á GUFUAUGUM

Elstu heimildir um athuganir á gasi í gufuaugum í Námafjalli eru niðurstöður Baldurs Líndals frá 1950 og 1951 (Jarðboranir ríkisins 1951). Baldur tók mörg sýni og efnagreindi á þessum árum og hefur hann góðfúslega látið í té niðurstöður fleiri greininga. Í skýrslu Guðmundar Guðmundssonar o.fl. (1971) er skýrt frá mörgum greiningum á rúmmálshlutföllum gastegunda í gufu, en ekki gerð tilraun til að meta hlutfall gass og þéttvatns. Loks hafa Stefán Arnórsson og Einar Gunnlaugsson (1985) birt greiningar á gasi úr allmörgum gufuaugum og Stefán Arnórsson og Hörður Svavarsson (1985) niðurstöður reikninga gashita út frá enn fleiri greiningum.

Gashiti hefur verið reiknaður á fernan hátt samkvæmt aðferðum þeirra Stefáns Arnórssonar og Einars Gunnlaugssonar (1985), þ.e. CO₂-hiti, H₂S-hiti, H₂-hiti og CO₂-H₂-hiti, fyrir niðurstöður Baldurs Líndals (Jarðboranir 1951 og Baldur Líndal, persónulegar upplýsingar), og einnig fyrir allmargar niðurstöður Orkustofnunar um borholur auk þess sem notaðar eru sams konar niðurstöður Stefáns Arnórssonar og Harðar Svavarssonar (1985).

Í mælingum Baldurs Líndals er ekki mældur styrkur koldíoxíðs og brennisteinsvetnis í þéttivatni og er gert ráð fyrir, að þéttvatnið sé mettað með tilliti til þessara gasa og tilsvarendi styrk bætt við. Niðurstöður af þessum fjórum aðferðum til ákvörðunar gashita og meðaltöl

þeirra eru birt í töflum 1 og 3 og á mynd 1. Í ljós kemur allhár gashiti í Hverarönd og austurhluta fjallsins, og bendir niðurstaða Stefáns Arnórssonar og Harðar Svavarssonar (1985) frá einu sýni til nokkurrar lækkunar á hita á því svæði miðað við niðurstöður Baldurs Línalds (persónulegar upplýsingar, Jarðboranir ríkisins 1951, Guðmundur Guðmundsson o.fl. 1971) um 30 árum fyrr, en ekki er víst að munurinn sé marktækur vegna óvissu í reikningi á niðurstöðum Baldurs.

Baldur Línald (persónulegar upplýsingar) náði aðeins einu sýni úr Bjarnarflagi og segir að þar hafi árið 1952 verið lítið gufstreymi og erfitt að ná sýnum. Gashiti þess sýnis er meðal hinna lægri sem fengust á þeim tíma, en þó nokkru hærri en sá, sem mældist í flestum þeim gufuaugum, sem Stefán Arnórsson og Hörður Svavarsson (1985) skýra frá. Þá lækkun er eðlilegt að rekja til þeirrar kólnunar og breytinga á rennsli, sem urðu við umbrotin árið 1977 (sjá Inn-gang). Athyglisvert er að á árunum 1983-84 hafa náðst sýni víða í Bjarnarflagi án umtalsverðra erfiðleika svo að vera má að rennsli hafi aukist þar á þessum árum. Sýni Baldurs Línalds (persónulegar upplýsingar) úr Bjarnarflagi er frá sama stað og eitt af sýnum Stefáns Arnórssonar og Harðar Svavarssonar (1985), og bendir niðurstaðan til kólnunar, einkum hafa orðið breytingar á H_2S -hita, H_2 -hita og CO_2 - H_2 -hita, en CO_2 -hiti hefur breyst minna.

Reiknað hefur verið staðalfrávik fyrir þessar 4 aðferðir og er það allhált fyrir sýni Baldurs, en viðunandi fyrir flest sýni Stefáns og Harðar, og því verjandi að styðjast við meðaltöl gashita þegar um þau er fjallað, sé gert ráð fyrir að efnagreininganiðurstöður séu réttar. Helstu hugsanlegir skekkjuvaldar eru hvörf H_2S í uppstreymisrás, sem lækka H_2S -hita; hugsanleg suða í uppstreymisrás, sem gæti valdið útfellingu kalsíts og því lækkun CO_2 -hita, og um leið hækkun CO_2 - H_2 hita, en einnig að gas rjúki úr gufunni, og er þá H_2 reikulast og gæti helst sloppið, og myndu þá H_2 og CO_2/H_2 hitar lækka. Augljóst er að H_2S hiti er óeðlilega lágur í gufuauga J (tafla 1) og í lægra lagi í gufuauga Q. CO_2 -hiti er aftur á móti í lægra lagi í augum E og H. Með þessa varnagla í huga telst æskilegra að styðjast við meðaltöl í samanburði, en sleppa gufuauga J alveg.

Meðaltöl gashita og jafnhitalínur fyrir þau voru fengin frá niðurstöðu Stefáns Arnórssonar og Harðar Svavarssonar (1985) og eru þær niðurstöður dregnar inn á mynd 1. Greinileg hækkun gashita virðist vera frá vestri til austurs, ef svæðið er athugað í heild en einnig frá suðri til norðurs, þó að hún sé ekki jafn greinileg (mynd 1). Sé svæðinu hins vegar skipt í tvennt, Hverarönd (sýni A-K að J undanskildu) og Bjarnarflag (sýni L-X) kemur fram marktækur munur í H_2S , H_2 og meðalgashita, og næstum marktækur í CO_2 -hita. Þar eð vestasta sýnið, sem telst til Hverarandar, K, gefur allmiklu lægri hita en næstu sýni fyrir austan, virðist það falla betur í hóp Bjarnarflags- en Hverarandarsýna, og miðað við þá flokkun er líka marktækur munur á CO_2 -hita í vestari og austari hópnum (tafla 2).

3. EFNASTYRKUR BORHOLURENNIS

Eldri heimildir um efnastyrk borholuvökva er að finna hjá Stefáni Arnórssyni (1968, 1978), Guðmundi Guðmundssyni o.fl. (1971) og Stefáni Arnórssyni og Einari Gunnlaugssyni (1985), Benedikt Steingrímssyni og Gesti Gíslasyni (1977), Jóni Benjamínssyni og Pétri Yngvasyni (1987) og Trausta Haukssyni og Jóni Benjamínssyni (1988, 1989, 1990, 1991, 1992). Þá hafa de Zeeuw og Gíslason (1988) og Magnús Ólafsson og Hrefna Kristmannsdóttir (1989) gert efnafræði kalds og heits grunnvatns á svæðinu skil.

Alls fundust niðurstöður rúmlega tvöhundruð heildarefnagreininga úr holunum tólf, sem borðar hafa verið í Námafjalli. Einhverjar slíkar upplýsingar fundust um allar holurnar.

Reikningar á styrk efna í djúpvatni hafa verið gerðir fyrir valin sýni úr holum B-4 – B-12. Fyrir holur B-4 og 5 var viðmiðunarhitastig metið frá gögnum Ásgríms Guðmundssonar o.fl. (1989) um líklegan innstreymishita (tafla 4), en fyrir B-6 – B-12 var stuðst við kvarshita. Þessi viðmiðunarhitastig hafa verið notuð til ákvörðunar vermis í holum B-4 - B-10 vegna reikninga á gashita og ópalmettun, en í holum B-11 og B-12 hafði vermi verið ákvarðað og er stuðst við niðurstöður þeirra ákvarðana við alla frekari reikninga.

Yfirleitt er efnastyrkur tiltölulega stöðugur í djúpvatni, pH milli 7 og 8 og uppleyst steinefni um 1 g/l. Klóríð og súlfat eru mikilvægustu anjónirnar og skiptast á um að vera í mestum styrk. Ekki er augljóst hvað veldur þeim sveiflum. Styrkur efna í dæmigerðu djúpvatni úr holu B-4 fyrir og eftir umbrot og úr holum B-11 og B-12 í upphafi blásturs og árið 1992 er birtur í Töflu 5. Djúpgufa reiknast í holum 11 og 12, og er samsetning hennar sýnd í töflu 6. Jarðhita-vökvinn er mjög heppilegur til vinnslu, efnasnaúður og ætti ekki að vera tærandi.

Jón Ólafsson (1978) gerði athuganir á styrk kvikasilfurs og arsens í renni borholanna og komst að raun um að hvorttveggja væri neðan skaðsemismarkna v/fiskeldis og áveitna en arsen of mikið fyrir drykkjarvatn (tafla 8). Þá hefur Halldór Ármannsson (1977) fjallað um styrk radons, sem er lítill og gefur til kynna góða lekt.

Gasstyrkur er alla jafna mjög lágur og er samsetning gassins nokkuð frábrugðin þeirri, sem víða þekkist á jarðhitasvæðum, einkum hvað varðar tiltölulega mikinn vetnisstyrk, en styrkur brennisteinsvetnis er einnig allmikill (tafla 7). Gasstyrkur jókst talsvert við umbrotin 1977, einkum styrkur CO₂ eins og við var að búast, ef eldfjallagas fylgir umbrotum. Í kjölfarið er at-hyglisvert, að styrkur metans jókst töluvert og bendir það til meiri áhrifa grynna rennslis en áður. Útstreymi koldíoxíðs og brennisteinsvetnis á ári miðað við núverandi gufuútstreymi hefur verið reiknað fyrir holur og gufuaugu (tafla 9). Reikna má með tvisvar til þrisvar sinnum meira gasútstreymi úr holum, ef virkjuð verða 20 MW af raforku í Bjarnarflagi. Í heild má segja að gasstreymi sé lítið, en tiltölulega stór hluti þess er brennisteinsvetni og gæti það kallað á sérstakar aðgerðir við virkjun.

Samsetning vatns og gufu við skiljuþrýstinginn 9,4 bar a, þ.e. inntaksþrýsting þann sem gert er ráð fyrir í hönnunarforsendum (Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns hf. 1993), hefur verið reiknuð fyrir sýni úr holum B-11 og B-12 frá 1992 og úr holu B-4 frá 1985, og er sýnd í töflu 10. Sýrustig er um eða rétt undir 8, uppleyst steinefni eru um 1 g/l og gasstyrkur 0,31-0,45%. Niðurstöður sams konar reikninga fyrir skiljuþrýstinginn 1,0 bar a eru svo sýndar í töflu 11. Þá er sýrustig komið vel yfir 8, uppleyst steinefni 1,1-1,6 g/l, en gasstyrkur 0,13-0,40%.

4. EFNAHITI

Í kaflanum um gufuaugu er nokkuð fjallað um gashita, og hefur hann verið reiknaður fyrir allmörg sýni úr borholum í Bjarnarflagi á mismunandi tímum. Miklu meiri dreifing er í niðurstöðum þeirra fjögurra gashita, sem athugaðir hafa verið fyrir borholugas, en fyrir gas úr gufuaugum (tafla 3).

Kvarshiti (Fournier and Potter 1982) er nærri mældum hita í gömlu holunum, en miklu lægri en sá mældi í B-11 og B-12. Svipuðu máli gegnir um Na/K hita (Stefán Arnórsson o.fl. 1983). Mælingar í holum B-11 og B-12 eftir borun sýndu innstreymi með u.þ.b. 300°C hita. Hita- og þrýstímælingar í holu B-11 í blæstri (Ásgrímur Guðmundsson o.fl. 1989) sýna hins vegar að holan "sýður sig í botn," sem kallað er. Þannig er hiti neðst í holunni 255°C – 260°C og þrýstingur u.þ.b. 45 bar á við þessar aðstæður. Væntanlega er líkt á komið með holu 12 þó ekki hafi hún verið mæld í blæstri. Eins og hátt vermi ber vott um, er tveggja fasa innstreymi í báðar holurnar og því suða úti í bergi. Má þá ætla, að hiti sé talsvert miklu lægri en 300°C á nokkru svæði umhverfis holurnar, og að þessi hiti ráði efnajafnvægjum holuvökvans. Þessi ályktun fær stuðning af reiknaðri kalkmettun (sjá næsta kafla) auk þess að skýra hvers vegna svo miklu munar á kvarshita, Na/K hita og gashita annars vegar og mældum hita eftir borun hins vegar. Þetta er ástæða þess að kvarshiti var valinn sem viðmiðunarhiti í holum B-11 og B-12 í stað mælds hita eftir borun.

Suða í bergi veldur að öllum líkindum kalsítútfellingum og gæti orðið til þess að CO₂ styrkur er víða lágur og CO₂-hiti því líka. Sama ástæða myndi því liggja til hásk CO₂-H₂-hita. Því er ástæða til að ætla, að H₂S og H₂-hiti ættu að gefa betri niðurstöður um innstreymishita í holur en CO₂ og CO₂/H₂-hiti. Ólíklegt er að sama gildi um gufuaugu, þ.e. að suða og kalsítútfelling eigi sér stað, áður en gufan kemst í uppstreymisrás. Þar er hins vegar meiri hættu á hvörfum eins og súlfíðútfellingum, þar sem uppstreymi er tregt, og má því í einstökum augum reikna með of lágum H₂S-hita.

Nokkrar breytingar má sjá í efnahita um og eftir umbrotin, oft hækkun fyrst, en síðan lækkun eftir að kaldara vatn fer að streyma inn í kerfið. Einna skýrast kemur þetta fram í holu 10 eins og fram kemur á mynd 2. Efnahiti í nokkrum holum fyrir og eftir umbrot er skráður í töflu 12 og er H₂S-hiti notaður sem gashiti. Tole o.fl. (1993) hafa athugað jafnvægi margra steinda við mismunandi hitastig í sýnum úr holum B-4 og B-8 árið 1979 og komist að raun um að jafnvægi-hiti innstreymis hafi þá verið 185°C í B-4 og 160°C í B-8. Stefán Arnórsson (1978) taldi, að greinileg lækkun á efnahita hefði komið fram í eldri holunum frá upphafi blásturs og fram til 1976 og rakti til suðu í bergi vegna mikillar vinnslu. Niðurstöður Ómars Sigurðssonar (1993) eru hins vegar þær að niðurdráttur í jarðhitakerfinu vegna vinnslu síðastliðin 30 ár sé mjög lítil, þannig að vinnsla hefur ekki haft merkjanleg áhrif á suðu í jarðhitageyminum. Í því gagnasafni, sem nú hefur verið athugað, er ekki unnt að sjá marktæka breytingu í meðalefnahita í holum 4-9 frá 1973 fram til umbrota. Ekki kemur heldur fram lækkun í efnahita í holum B-11 og B-12 frá upphafi blásturs (1979-1980) og fram til 1992.

Sé reiknuð fylgni hinna ýmsu efnahita við áætlaðan innstreymishita í borholunum, fæst nokkur fylgni kísilhita við hann (um 0,5), og einhver fylgni H₂S-hita (um 0,3) en aðrir efnahitar sýna enga fylgni. Sýnir það verulega óvissu í notkun efnahita á þessu svæði, en þess ber þó að geta að gögn um áætlaðan berghita eru ekki eins og best yrði á kosið. Hluta skýringarinnar er að finna í áhrifum eldsumbrota og hluta í áhrifum "suðu í botn", en nánari athugun þarf til að komast til botns í því misræmi, sem hér er um að ræða.

5. ÚTFELLINGAHÆTTA

Þær tegundir útfellinga, sem helst hefur orðið vart í vinnsluholum á Íslandi eru kalsítútfellingar og járnsúlfíðútfellingar. Aðrar útfellingar, sem vart hefur orðið, eru járn-kísilsambönd, ál-kísilsambönd, anhydrít (kalsíum súlfat), járnnoxíð, koparsúlfíð og kísilsambönd við lágt hitastig og þrýsting (Hrefna Kristmannsdóttir 1988). Gerðir hafa verið reikningar fyrir fjölda sýna til að kanna yfirmettun og þar með möguleika á útfellingum af völdum ofangreindra efna. Borholurenni í Námafjalli virðist oftast nálægt kalsítmettun við innstreymi.

Kalsítmettunarferlar fyrir dæmigerð sýni úr B-4, B-11 og B-12 eru sýndir á mynd 3. Vökvinn í holunum er nálægt mettun við djúphita, eins og við er að búast. Væri viðmiðunarhiti í holum B-11 og B-12 hins vegar valinn 300°C myndi vökvinn í þeim reiknast nokkuð yfirmettaður, en það væri óeðlilegt, því kalsít fellur út að kalla samstundis. Mettunarferlar fyrir B-4, fyrir og eftir umbrot, eru nánast eins.

Þau sýni úr holum B-11 og B-12, sem járn hefur verið mælt í, hafa reynst mjög undirmettuð m.t.t. allra helstu járnsteinda, þ.e. pyríts, pýrrhótíts, markasíts, götíts og magnetíts. Þá er vökvi úr Námafjalli undirmettaður með tilliti til anhydríts.

Kísill fellur ekki út í borholum við háan þrýsting, þar eð borholuvökvi er yfirleitt mettaður með tilliti til kvars, sem fellur mjög hægt út. Hins vegar fellur ópall mun hraðar út, og þegar ópalmettunarmörkum er náð, er mikil hætta á útfellingum. Ópalmettun er svipuð í Námafjallsholum og eru gildi fyrir holur 4, 10, 11 og 12 gefin í töflu 13. Ópalmettunarmörk voru allhá í þeim af gömlu holunum sem voru heitastar, fóru í 10 bar a í holu 10, sem var þeirra heitust. Í holunum austan Krummaskarðs hefur kísilstyrkur verið tiltölulega lítill miðað við hita, og ópalmettunarþrýstingur í holu B-11 hefur sveiflast frá tæpum 3 bar a í rúma 6 bar a og í holu B-12 frá rúmum 3 bar a í tæpa 8 bar a. Við sýnatöku 1990 var ópalmettunarþrýstingur innan við 7 bar a í B-4, B-11 og B-12 (tafla 13) og er hann það alla jafna á núverandi vinnslusvæði.

Reiknuð ópalmettunarmörk hafa sveiflast upp og niður með tíma og er ekki unnt að tala um ákveðna stefnu. Þau eru háð kísilstyrk, og til langs tíma litið ætti vökvinn að vera í jafnvægi við bergið, og ópalmettunarmörk að stjórna af hita innstreymis. Reiknuð ópalmettunarmörk eru næm fyrir tiltölulega litlum breytingum í kísilstyrk og sennilega má rekja einhverjar af þeim sveiflum, sem hér koma fram til skorts á mælinákvæmni í kísilgreiningum.

Reiknuð hefur verið ópalmettun við mismunandi hitastig og þrýsting miðað við suðu rennis frá innstreymishita í 100°C og síðan kælingu frá 100°C í 70°C fyrir nýleg sýni úr holum B-04, B-11 og B-12. Niðurstöður eru sýndar á mynd 4 sem $\log(Q/K)$, þar sem Q stendur fyrir margfeldi mælds styrks útfellingarspesía ópals, en K fyrir jafnvægisfasta sömu spesía. Í þessu tilfelli gildir $\text{SiO}_2(\text{ópall}) \rightleftharpoons \text{SiO}_2(\text{aq})$, $K = \text{SiO}_2(\text{aq})$ og því er Q/K hlutfallið milli leysts kísils, og þess sem fræðilega á að leysast, ef leysni ópals ræður. Mettun eða jafnvægi ríkir ef $\log(Q/K) = 0$. Sjá má, að nýta má vökvann niður í a.m.k. 150°C hita (eða skiljuþrýsting 4,8 bar abs) án þess að til ópalyfirmettunar þurfi að koma. Á myndinni er sýnt ástand við 9,4 bar abs, eða þann skiljuþrýsting, sem mælt er með í hönnunarfosendum virkjunar (Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns hf. 1993), og kemur í ljós, að skiljuvatn yrði verulega undirmettað með tilliti til ópals við þau skilyrði. Þá voru og könnuð áhrif þess að blanda skiljuvatni frá holu B-12 við þéttivatn, og eru blöndunarhlutföll, upphafshitastig og blöndunarhitastig skráð í töflu 14. Ekki voru til fullnægjandi niðurstöður til slíkra reikninga fyrir nýrra sýni en frá 1989, og var stuðst við sýni

895001 frá 30/5 1989 úr holu B-12 (Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson 1989). Niðurstöður um efnasamsetningu blandnanna eru í Viðauka 1 ásamt niðurstöðu reikninga á spesíudreifingu og mettunarástandi ýmissa steinda. Ópalmettunarstig er sýnt á mynd 4 og sýnir að ekki væri hættá á ópálútfellingum úr slíkri blöndu.

6. UPPRUNI

Darling og Ármannsson (1989) hafa fjallað um uppruna jarðhitavatnsins í Námafjalli. Er það verulega frábrugðið grunnvatni á svæðinu hvað varðar samsætuhlutföll (tafla 11), og hlýtur að hafa fallið sem regn miklu hærra yfir sjávarmáli, líklega á Vatnajökulssvæðinu miðað við grunnvatnshlutföll Braga Árnasonar (1976). Freyr Þórarinnsson (1980) komst að því að grunnvatn rynni suðvestur um Kröflu og Námafjall til Mývatns og Þóroddur Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson (1983) og de Zeeuw og Gestur Gíslason (1988) fundu að grunnvatn safnaðist saman við Námafjall og rynni þaðan til suðurs og vesturs. Öðru máli virðist gegna um jarðhitavatnið, sem eins og áður segir á uppruna sinn fyrir sunnan svæðið og hlýtur því að renna frá suðri til norðurs. Vitað er að Mývatn á svipaðan uppruna að hluta skv. athugunum Friedmans o.fl. (1963).

Töluverð súrefnistilfærsla, þ.e. frávik ^{18}O hlutfalls frá regnlínu kemur fram (mynd 5). Bendir það til samspils milli bergs og vatns, þ.e. tiltölulega lágs vatns/bergs hlutfalls, sem gefur til kynna, að almenn leiðni sé meiri en t.d. í Kröflu, þar sem sprunguleiðni virðist meira ráðandi. Eins og áður var minnst á er radonstyrkur lágur og er það í samræmi við þessa túlkun.

Ómar Sigurðsson (1993) fær þá niðurstöðu úr líkanreikningum, að kerfið þurfi að vera mjög stórt, og eru niðurstöður þeirra athugana, sem hér er greint frá, ekki í andstöðu við þær.

Athyglisvert er, að í holu B-4, sem niðurstöður eru til um, bæði frá því fyrir og eftir umbrot, hefur ekki orðið marktæk breyting á samsætuhlutföllum (tafla 11), og bendir það til þess, að sú kólnun og líklega rennslisaukning, sem á sér stað við umbrotin, eigi ekki uppruna sinn í staðbundnu grunnvatni, sem kemst inn, heldur aukinni innrás hins djúpa streymis, sem færir jarðhitakerfið, og Mývatn að hluta. Þessi niðurstaða þarf ekki að stangast á við þá ályktun, að meiri áhrifa grynna rennslis gæti eftir umbrot en fyrir, því að gert er ráð fyrir tveimur vatnskerfum, hinu grynna ($\delta\text{D} \approx 88\text{‰}$ SMOW), sem nær e.t.v. á 200 m dýpi, og hinu dýpra ($\delta\text{D} \approx 100\text{‰}$ SMOW), sem liggur þar undir allt niður á 2-3 km, og mætti því ætla að meira rennslis komi nú úr grynri hluta dýpra kerfisins en fyrir umbrot.

7. HELSTU NIÐURSTÖÐUR

Gashiti er hæstur á austanverðu Námafjallssvæðinu, þ.e. í Hverarönd og austanverðu fjallinu. Hann hefur lækkað töluvert í Bjarnarflagi milli 1952 og 1982, sennilega við umbrot tengd Kröflueldum 1977, en lítið breyst í Hverarönd.

Boranir beggja vegna Krummaskarðs hafa leitt í ljós tiltölulega efnasnaudan vökva (uppleyst steinefni u.þ.b. 0,1%) með pH á bilinu 7-8. Vökvinn ætti því ekki að vera tærandi né mengandi fyrir umhverfið. Reikningar á niðurstöðum efnagreininga sýna, að ekki ætti að vera hætta á myndun þeirra útfellinga sem algengastar eru við jarðhitavinnslu á Íslandi. Ópalmettunarmörk reyndust hæst í hinu vökvaríka kerfi vestan Krummaskarðs við umbrotin 1977 (10 bar a), en hafa ekki farið yfir 8 bar a í holum B-11 og B-12, sem síðar voru boraðar austan Krummaskarðs. Gasstyrkur í gufu er lágur, fór hæst nokkuð yfir 1% af massa hennar vestan Krummaskarðs eftir umbrotin 1977, en var 0,3-0,5% af massa hennar við áætlaðan hönnunarþrýsting (9,4 bar a) í holum B-4, B-11 og B-12 árið 1992, þegar síðast var mælt. Sá böggull fylgir skammrifi, að um helmingur þess gass er brennisteinsvetni og gætu komið upp kröfur um eyðingu þess, ef vinnsla á svæðinu verður aukin. Það mat er sett fram, að allt að 4000 tonn H_2S /ári gætu farið til andrúmslofts frá núverandi holum og 20 MW virkjun til viðbótar, ef engin hreinsun færi fram.

Regnuppruni jarðhitavökvans virðist liggja hærra í landi, þá langt sunnan svæðisins, sennilega í Vatnajökli, og niðurstöður athugana á radon benda til töluverðrar lektar í jarðhitakerfinu. Í heild má segja, að niðurstöður efnafræðiathugana bendi til tiltölulega hagstæðs svæðis til virkjunar jarðhita. Gerðir hafa verið reikningar um kalsít- og ópalútfellingahættu við fyrirhugaðan skiljuþrýsting 9,4 bar abs, og þarf ekki að óttast útfellingar við þann þrýsting, þó að dælt yrði niður við hann. Sams konar reikningar fyrir blöndur skiljuvatns og þéttivatns í mismunandi hlutföllum benda ekki til útfellingahættu fyrir neinar þær steindir, sem hugsanlega gætu fallið út.

8. TILLÖGUR UM FREKARI AÐGERÐIR

Áður en lagt verður í byggingu 20 MW virkjunar í Námafjalli er lagt til að fram fari nákvæm söfnun sýna úr gufuaugum á öllu svæðinu til að fá betri gögn um þann mun á gashita, sem fram kemur á milli Bjarnarflags og Hverarandar, og fá betra yfirlit yfir dreifingu gashita á sjálfu fjallinu. Niðurstöður viðnámsmælinga á Námafjallssvæðinu (Ragna Karlsdóttir 1993) benda eindregið til þess að Bjarnarflag og Hverarönd séu hlutar af einu og sama jarðhitakerfi. Einnig þarf að fara fram nákvæmt umhverfismat. Þarf það að taka til nauðsynlegs jarðrasks og áhrifa þess (t.d. á lífríki), fyrirsjáanlegra massabreytinga í jarðhitakerfinu og hugsanlegra afleiðinga þeirra, hávaða frá borholum og vélum, varmbreytinga í nágrenni og mögulegra áhrifa þeirra, óhjákvæmilegs gasútblasturs, efna í affallsvatni og styrks einstakra óæskilegra efna, mögulegra árekstra gerðar mannvirkja við ákvæði reglugerða um verndun svæðisins, ráðstafana til kynningar, þannig að aðgerðir séu almenningi þóknanlegar, og tillagna um hvernig eftirliti með svæðinu skuli háttað eftir að virkjunaraðgerðir hefjast. Einnig þarf að meta áhrif mismunandi förgunaraðferða affallsvatns á grunnvatn á Mývatnssvæði. Nægar mæliniðurstöður eru fyrir hendi til að gera slíkt mat, nema hvað varðar mælingar á hávaða frá borholum.

Tafla 1. Gashiti (í °C) reiknaður á fernen hátt fyrir sýni sem Baldur Líndal tók á árunum 1950-1952 (Jarðboranir ríkisins 1951, Baldur Líndal persónulegar upplýsingar, Guðmundur Guðmundsson o.fl. 1971); og fyrir sýni Stefáns Arnórssonar og Harðar Svavarssonar (1985).

Staður	CO ₂ hiti	H ₂ S hiti	H ₂ hiti	CO ₂ - H ₂ hiti	Meðaltal	Sýni frá
N-1	271	303	331	304	302 ± 24	B. Líndal
N-2	271	303	323	304	300 ± 22	B. Líndal
N-3	289	313	345	297	311 ± 25	B. Líndal
N-4	286	313	345	299	311 ± 25	B. Líndal
N-5	295	315	338	294	310 ± 21	B. Líndal
N-6	304	315	329	284	308 ± 19	B. Líndal
N-7	306	312	348	277	311 ± 29	B. Líndal
N-8	304	318	321	287	308 ± 16	B. Líndal
N-9	291	306	311	288	299 ± 11	B. Líndal
N-13	250	304	275	323	288 ± 32	B. Líndal
N-20	245	297	258	320	280 ± 35	B. Líndal
Borhola H-1	281	303	319	294	299 ± 16	B. Líndal
Borhola H-2	277	301	309	296	296 ± 14	B. Líndal
A	276	284	290	301	288 ± 10	St.A. & H.S.
B	291	293	288	282	288 ± 5	St.A. & H.S.
C	279	295	268	260	276 ± 15	St.A. & H.S.
D	282	289	270	261	276 ± 12	St.A. & H.S.
E	256	274	279	300	277 ± 18	St.A. & H.S.
F	267	290	285	301	286 ± 14	St.A. & H.S.
G	264	280	284	301	282 ± 15	St.A. & H.S.
H	255	270	278	299	276 ± 18	St.A. & H.S.
I	267	269	271	278	271 ± 5	St.A. & H.S.
J	245	100	224	213	196 ± 65	St.A. & H.S.
K	246	263	245	249	251 ± 8	St.A. & H.S.
L	249	256	241	240	246 ± 8	St.A. & H.S.
M	242	266	249	259	254 ± 11	St.A. & H.S.
N	241	231	234	234	235 ± 4	St.A. & H.S.
O	251	232	239	235	239 ± 8	St.A. & H.S.

Tafla 1. (frh)

Staður	CO ₂ hiti	H ₂ S hiti	H ₂ hiti	CO ₂ - H ₂ hiti	Meðaltal	Sýni frá
P	248	215	230	221	228 ± 14	St.A. & H.S.
Q	247	181	241	241	228 ± 31	St.A. & H.S.
R	249	221	246	248	241 ± 13	St.A. & H.S.
S	247	242	260	275	256 ± 15	St.A. & H.S.
T	230	244	241	254	241 ± 10	St.A. & H.S.
U	260	269	274	289	273 ± 12	St.A. & H.S.
V	252	252	253	258	254 ± 3	St.A. & H.S.
X	250	258	269	288	266 ± 16	St.A. & H.S.
Y	254	253	253	257	254 ± 2	St.A. & H.S.

Tafla 2. Meðaltöl gashita í vesturhluta (Bjarnarflagi) og austurhluta (Hverarönd) Námafjallssvæðisins.

Svæði	Staðir	Meðal CO ₂ -hiti °C	Meðal H ₂ S -hiti °C	Meðal H ₂ -hiti °C	Meðal CO ₂ - H ₂ -hiti °C	Meðal Meðalgashiti °C
Hverarönd	A-K ¹⁾	268 ± 14	281 ± 11	275 ± 13	283 ± 20	277 ± 11
Bjarnarflag	L - Y	248 ± 7	240 ± 24	248 ± 13	254 ± 21	247 ± 14
Hverarönd	A - I	271 ± 12	283 ± 9	279 ± 8	287 ± 17	280 ± 6
Bjarnarflag	K - Y	248 ± 7	241 ± 24	248 ± 13	253 ± 20	248 ± 13

1) Að J undanskildum

Tafla 3. Gashiti reiknaður frá niðurstöðum efnagreininga nokkurra sýna úr borholum í Bjarnarflagi 1973-1992.

Hola nr.	Sýni nr.	Dags.	CO ₂ -hiti °C	H ₂ S-hiti °C	H ₂ -hiti °C	CO ₂ - H ₂ -hiti °C	Meðaltal °C
B-4	730054	73.05.13	128	231	235	317	228 ± 77
	760054	76.05.03	128	227	233	313	225 ± 76
	771183	77.10.12	246	283	324	304	289 ± 33
	791012	79.03.10	223	258	294	296	268 ± 35
	811046	81.07.19	164	233	232	304	233 ± 57
	851036	85.06.13	163	242	245	314	241 ± 62
	925003 ¹⁾	92.05.01	171	253	268	335	257 ± 67
B-5	730149	73.11.11	146	225	215	304	221 ± 63
	760174	76.11.26	155	224	215	299	223 ± 59
	791082	79.12.09	203	212	242	261	230 ± 27
B-6	730036	73.02.10	142	249	253	330	244 ± 77
	771088	77.04.25	155	236	235	311	234 ± 64
	771185	77.10.13	218	254	269	296	259 ± 33
B-7	730069	73.05.15	181	256	273	319	257 ± 57
	760077	76.06.26	212	257	275	301	261 ± 37
	771109	77.05.19	202	251	260	302	254 ± 41
B-8	730039	73.02.10	138	248	252	330	242 ± 79
	760167	76.11.22	176	237	237	302	238 ± 51
	771107	77.05.15	235	271	299	301	276 ± 31
	771186	77.10.13	236	272	309	300	279 ± 33
	791049	79.07.31	265	280	325	286	289 ± 26
B-9	730042	73.02.10	137	249	241	332	240 ± 80
	750059	75.02.23	166	243	234	313	239 ± 60
B-10	760026	76.03.18	154	256	258	332	250 ± 43
	771069	77.03.28	167	237	244	306	238 ± 57
	771114	77.05.22	189	242	246	300	244 ± 45
	771179	77.09.30	189	255	259	313	254 ± 51
	771208	77.12.08	217	253	275	295	260 ± 33
	781015	78.02.17	159	228	239	301	232 ± 58
	781052	78.06.28	175	237	252	302	242 ± 52
	791017	79.04.25	206	228	261	276	243 ± 32
	801015	80.03.29	201	248	261	300	252 ± 41
	B-11	791075	79.09.27	209	261	289	308
925002 ¹⁾		92.05.01	200	282	278	336	274 ± 56
B-12	811038	81.07.16	200	274	270	326	268 ± 52
	925001 ¹⁾	92.04.30	228	286	289	337	285 ± 45

1) Byggt á niðurstöðum frá Trausta Haukssyni og Jóni Benjamínssyni (1992)

Tafla 4. Námafjall. Holur B-1 - 12. Dýpi, æðar, hitastig innstreymis og hámarkshitastig fyrir og eftir umbrot (byggt á niðurstöðum frá Ásgrími Guðmundssyni o.fl. 1989).

Hóla nr.	Dýpi holu m	Dýpi helstu æða m	Hitastig helstu innstreymisæða °C		Dýpi á hámarks-hitastig m	Hámarkshitastig °C	
			Fyrir umbrot	Eftir umbrot(ár)		Fyrir umbrot	Eftir umbrot(ár)
1	342	260,337	220	e.á.	337	220	e.á.
2	492	230,280,421	250		400	250	160 (1988)
3	683	680	260	e.á.	683	262	e.á
4	1138	638,1036	250		>1000	280	
	630	~ 630		160 (1984)	550		200 (1984)
5	638	637	250	160 (1988)	600	250	
					350		225 (1988)
6	1193	1176	270				
	512			250		190 (1980)	
7	1206	787	250		1200	289	
	400				< 400		
8	1312	554,840,860	260		950	275	
9		481,648,1175	200-230		1300	>250	
	843				300-600		215-225
						843	
10	1809	700,919,1200 1467,>1700	270-300		>1200	>300	
	1519	550,1000,1450		150 (1980)	1497		300
11	1923	~ 1400		~ 300	1450		320
12	1999	1400		~ 300	1999		340

e.á = ekki ákvarðað

Tafla 5. Efnasamsetning djúpvatns í holum B-04, B-11 og B-12 frá því snemma á blásturstíma og árið 1992 (B-04 árið 1985).

Hola nr.	B-4	B-4	B-11	B-11	B-12	B-12
Sýni nr.	730054	851036	791075	925002 ¹⁾	811038	925001 ¹⁾
Dags.	73.05.13	85.06.13	79.09.27	92.05.01	81.07.16	92.04.30
Viðmiðunarhiti °C	250 ²⁾	200 ²⁾	250 ³⁾	248 ³⁾	236 ³⁾	259 ³⁾
pH	7,5	7,2	7,9	7,7	7,9	7,5
SiO ₂ mg/kg	552	422	501	484	450	523
Na "	135,0	138	101,0	91,1	127,0	120,6
K "	21,1	21,2	17,0	14,2	17,4	20,8
Mg "	0,034	0,000	0,003	0,009	0,003	0,010
Ca "	1,18	2,93	0,92	0,56	0,13	0,30
F "	1,520	0,630	0,493	0,660	0,762	0,504
Cl ⁻ "	7,19	49,3	38,9	30,8	10,2	79,1
SO ₄ "	58,2	19,4	12,2	18,6	3,76	9,88
Fe "	e.á	0,009	e.á.	e.á.	e.á.	0,01
Uppl.steinefni "	968	903	845	822	857	1024
CO ₂ "	105,0	136	25,9	18,2	20,4	31,1
H ₂ S "	153	167	82	146	132	143
H ₂ "	3,83	2,79	0,19	0,18	0,14	0,47
O ₂ "	0	0,12	0,02	0,02	0	0,04
CH ₄ "	2,23	5,56	0,01	0,02	0	0,03
N ₂ "	0	5,06	0	0,10	0,02	0,22

1) Niðurstöður frá Trausta Haukssyni og Jóni Benjamínssyni (1992).

2) Sbr. Ásgrímur Guðmundsson o.fl. (1989). Sjá töflu 3.

3) Kvarshiti

e.á.: ekki ákvarðað.

Tafla 6. Efnasamsetning djúpgufu í holum B-11 og B-12 frá því snemma á blásturstíma og 1992 miðuð við kvarshita.

Hola nr.	Sýni nr	Dags.	Kvarshiti °C	CO ₂ mg/kg	H ₂ S mg/kg	H ₂ mg/kg	O ₂ mg/kg	CH ₄ mg/kg	N ₂ mg/kg
B-11	791075	79.09.27	250	1392	926	137	9,54	7,79	0
	925002 ¹⁾	92.05.01	248.4	1232	2129	133	11,3	18,2	91,2
B-12	811038	81.07.16	236.4	1053	1378	152	0	2,57	28,4
	925001 ¹⁾	92.04.30	259.2	2314	2480	256	17,1	21,4	142

1) Niðurstöður frá Trausta Haukssyni og Jóni Benjamínssyni 1992.

Tafla 7. Gas í gufu við 9,4 bar a (án andrúmsloftsgasa, N₂, O₂, Ar).

Hola	Sýni nr.	Dags.	CO ₂ mg/kg	H ₂ S mg/kg	H ₂ mg/kg	CH ₄ mg/kg	Heildargas % af massa
B-4	730054	73.05.13	503	464	23	13	0,10
	760054	76.05.03	500	403	23	11	0,09
	771183	77.10.12	4549	2921	412	63	0,79
	791012	79.03.10	2955	1324	155	182	0,46
	811046	81.07.19	1871	1100	25	186	0,32
	851036	85.06.13	1832	1514	55	110	0,35
	925003 ¹⁾	92.05.01	1454	1550	147	113	0,33
B-5	731049	73.11.11	632	425	10	3	0,11
	760174	76.11.26	770	371	12	18	0,12
	791082	79.12.09	1754	237	24	141	0,22
B-6	730036	73.02.10	599	865	41	9	0,15
	771088	77.04.25	696	518	24	25	0,13
	771185	77.10.13	2237	996	59	69	0,34
B-7	730069	73.05.15	1173	1163	68	4	0,24
	760077	76.06.06	2053	1109	75	47	0,33
	771109	77.05.191	1552	854	41	16	0,25
B-8	730039	73.02.10	564	819	36	25	0,14
	760167	76.11.22	1307	657	25	17	0,20
	771107	77.05.15	2985	1578	143	106	0,48
	771186	77.10.13	3495	1829	230	60	0,56
	791049	79.07.31	9205	2949	370	547	1,31
B-9	730042	73.02.10	519	799	22	13	0,14
	750059	75.02.23	835	671	20	0	0,15
B-10	760026	76.03.18	646	990	58	7	0,17
	771069	77.03.28	758	477	32	7	0,13
	771114	77.05.22	1604	819	43	23	0,25
	771179	77.09.30	1120	910	46	68	0,21
	771208	77.12.08	2128	929	82	30	0,32
	781015	78.02.17	845	450	32	12	0,13
	781052	78.06.28	1202	654	41	29	0,19
	791017	79.04.25	3976	921	113	112	0,51
	801015	80.03.29	2059	1049	60	37	0,32
B-11	791075	79.09.27	1232	828	121	7	0,22
	925002 ¹⁾	92.05.01	1056	1826	112	15	0,30
B-12	811005	81.03.08	288	1123	19	0	0,14
	925001 ¹⁾	92.04.30	1957	2131	216	18	0,43

1) Niðurstöður frá Trausta Haukssyni og Jóni Benjamínssyni (1992)

Tafla 8. Námafjall. Styrkur As og Hg í djúpvatni í holum 6 og 10 ásamt gasstyrk á sama tíma, 1976 og 1977 (Jón Ólafsson 1978).

Staður Dags.	Gas í djúpvatni mg/l			As µg/l			Hg ng/l				Flæði g/klst
	CO ₂	H ₂	H ₂ S	Vatn	Þétt gufa	Djúp- vatn	Vatn	Þétt gufa	Gas	Djúp- vatn	
H-6 3.11.'76	155	3,9	163	98,1	9,3	83,9	15,5	241	109	70	
H-10 4.11.'76	225	8,5	225	160	5,5	126	17,8	71,6	68,3	52	25 As 0,01 Hg
H-6 31.8.'77	441	11,3	282	105	14,5	83,6	171	167	121	213	
H-10 31.8.'77	419	14,5	301	97,1	14,9	79,3	95,1	219	94,6	161	22,8 As 0,046 Hg
Leyfilegt magn í drykkjarvatni						50 ¹⁾				1000 ¹⁾	

1) Skv. EEC og FAO stöðlum um drykkjarvatn (van der Leeden o.fl. 1990).

Tafla 9. Árlegt streymi koltvíoxíðs og brennisteinsvetnis (tonn/ár) til andrúmslofts frá Námafjallssvæðinu við núverandi vinnslu.

	CO ₂	H ₂ S
Gufuaugu	2000	500
3MW Virkjun og Kísiliðjan	500	1300
Samtals	2500	1800

Tafla 10. Holar B-11, B-12 og B-4. Efnasamsetning skiljuvatns og gufu reiknuð við 9,4 bar abs.

Holar nr.	Sýni nr.	Dags	Vatn (mg/kg)													Gufa (mg/kg)						Heildar-gas %
			pH	B	SiO ₂	Na	K	Mg	Ca	F	Cl	SO ₄	Fe	HUS	CO ₂	H ₂ S	CO ₂	H ₂ S	H ₂	O ₂	CH ₄	
B-11	5002	92.05.01	7.86	e.á.	587	111	17.3	0.011	0.68	0.80	37.3	22.6	0.011	997	15.6	112	1866	114	9.7	15.6	78.2	0.31
B-12	5001	92.04.30	7.67	e.á.	654	151	26.0	0.012	0.37	0.63	98.9	12.4	0.012	1281	20.2	89.4	2161	218	14.6	18.2	121	0.45
B-4	1036	85.06.13	8.01	0.68	444	145	22.4	0.000	3.09	0.66	51.9	20.4	e.á.	951	41.1	109	1274	55.3	2.3	111	100	0.35

Tafla 11. Holar B-11, B-12 og B-4. Efnasamsetning vatns og gufu reiknuð við 1 bar a.

Holar nr.	Sýni nr.	Dags	Vatn (mg/kg)													Gufa (mg/kg)						Heildar-gas %
			pH	B	SiO ₂	Na	K	Mg	Ca	F	Cl	SO ₄	Fe	HUS	CO ₂	H ₂ S	CO ₂	H ₂ S	H ₂	O ₂	CH ₄	
B-11	5002	92.05.01	8.44	e.á.	744	140	21.9	0.014	0.86	1.0	47.3	28.6	0.014	1264	23.6	78.6	1663	100	8.5	13.6	68.4	0.28
B-12	5001	92.04.30	8.24	e.á.	838	193	33.3	0.016	0.48	0.81	127	15.8	0.016	1641	28.2	58.8	1934	192	12.9	16.1	107	0.40
B-4	1036	85.06.13	8.76	0.80	523	171	26.3	0.00	3.63	0.78	61	24.0	e.á.	1118	33.1	60.9	616	145	0.6	29.0	26.3	0.13

Tafla 12. Efnahiti reiknaður fyrir nokkur sýni úr borholum í Námafjalli 1964-1992.

Hola nr.	Sýni nr.	Dags.	Áætlaður innstreymis-hiti °C	Kvarshiti °C	Na/K hiti °C	H ₂ S-hiti °C
1		64.02.21 ¹⁾	217	217	200	
3		68.07.19 ¹⁾	260	264	282	
4	730054	73.05.13	250	266	246	231
	760054	76.05.03	250	250	277	227
	771183	77.10.12	250	274	243	283
	791012	79.03.10	200	242	254	258
	811046	81.07.19	200	241	240	233
	851036	85.06.13	200	237	249	242
	925003 ¹⁾	92.05.01	200	254	236	253
5	730149	73.11.11	250	224	250	225
	760174	76.11.26	250	208	252	224
	791082	79.12.09	250	205	226	212
6	730036	73.02.10	270	254	244	249
	771088	77.04.25	270	260	235	236
	771185	77.10.13	270	261	242	254
7	730069	73.05.15	250	248	274	256
	760077	76.06.26	250	267	237	257
	771109	77.05.19	250	268	277	251
8	730039	73.02.10	260	253	247	248
	760167	76.11.22	260	237	265	237
	771107	77.05.15	260	286	264	271
	791049	79.07.31	200	237	217	280
9	730042	73.02.10	220	265	252	249
	750059	75.02.23	220	260	252	243
10	760026	76.03.18	280	272	270	256
	771069	77.03.28	280	283	255	237
	771114	77.05.22	280	281	249	242
	771179	77.09.30	280	281	246	255
	771208	77.12.08	280	267	236	253
	781015	78.02.17	250	242	258	228
	781052	78.06.28	220	234	243	237
	791017	79.04.25	200	200	233	228
	801015	80.03.29	150-200	228	228	248
11	791075	79.09.27	250 ³⁾	250	259	261
	925992 ²⁾	92.05.01	250 ³⁾	248	250	282
12	811038	81.07.16	250 ³⁾	236	237	274
	925001 ²⁾	92.04.30	250 ³⁾	259	261	286

1) Stefán Arnórsson (1968)

2) Byggt á niðurstöðum frá Trausta Haukssyni og Jóni Benjamínssyni (1992)

3) Hiti við æð eftir að holan hefur soðið sig í botn. Berghiti er 300°C

Tafla 13. Hitastig og þrýstingur ópalmettunar fyrir nokkur sýni úr holum B-4, B-10, B-11 og B-12

Hola nr.	Sýni nr	Dags.	t óp °C	P óp bar a	Athugasemdir
B-4	730054	73.05.13	157	5,7	Dæmigert sýni af svæðinu vestan og norðan Krummaskarðs fyrir umbrot
B-4	925003 ¹⁾	92.05.01	138	3,4	Nýjustu upplýsingar
B-10	771069	77.03.28	180	10,0	Hágildi í kjölfar umbrota
B-11	791075	79.09.27	161	6,3	Nálægt upphafi blásturs. Hágildi fyrir B-11
B-11	861012	86.05.21	133	2,9	Lággildi fyrir B-11
B-11	925002 ¹⁾	92.05.01	153	5,2	Nýjustu upplýsingar
B-12	811005	81.03.08	168	7,5	Nálægt upphafi blásturs
B-12	861013	86.05.21	139	3,5	Lággildi fyrir B-12
B-12	895001	89.05.30	170	7,9	Hágildi fyrir B-12
B-12	925001 ¹⁾	92.04.30	164	6,8	Nýjustu upplýsingar

1) Byggt á niðurstöðum frá Trausta Haukssyni og Jóni Benjamínssyni (1992)

Tafla 14. Blöndunarhlutföll og hitastig fyrir blöndun vatns og þéttvatns úr holu B-12 (Sýni 895001).

Skiljuvatn l	Skiljuvatn Hitastig °C	Þéttvatn l	Þéttvatn Hitastig °C	Blanda l	Blanda Hitastig °C
51.3	172.2	42.4	45	93.7	117.4
51.3	172.2	21.2	45	72.5	138.5

Tafla 15. Námafjall. Niðurstöður $\delta^2\text{H}$ og $\delta^{18}\text{O}$ ákvarðana á sýnum úr háhitaholum, grunnum holum og uppsprettum (‰ SMOW).

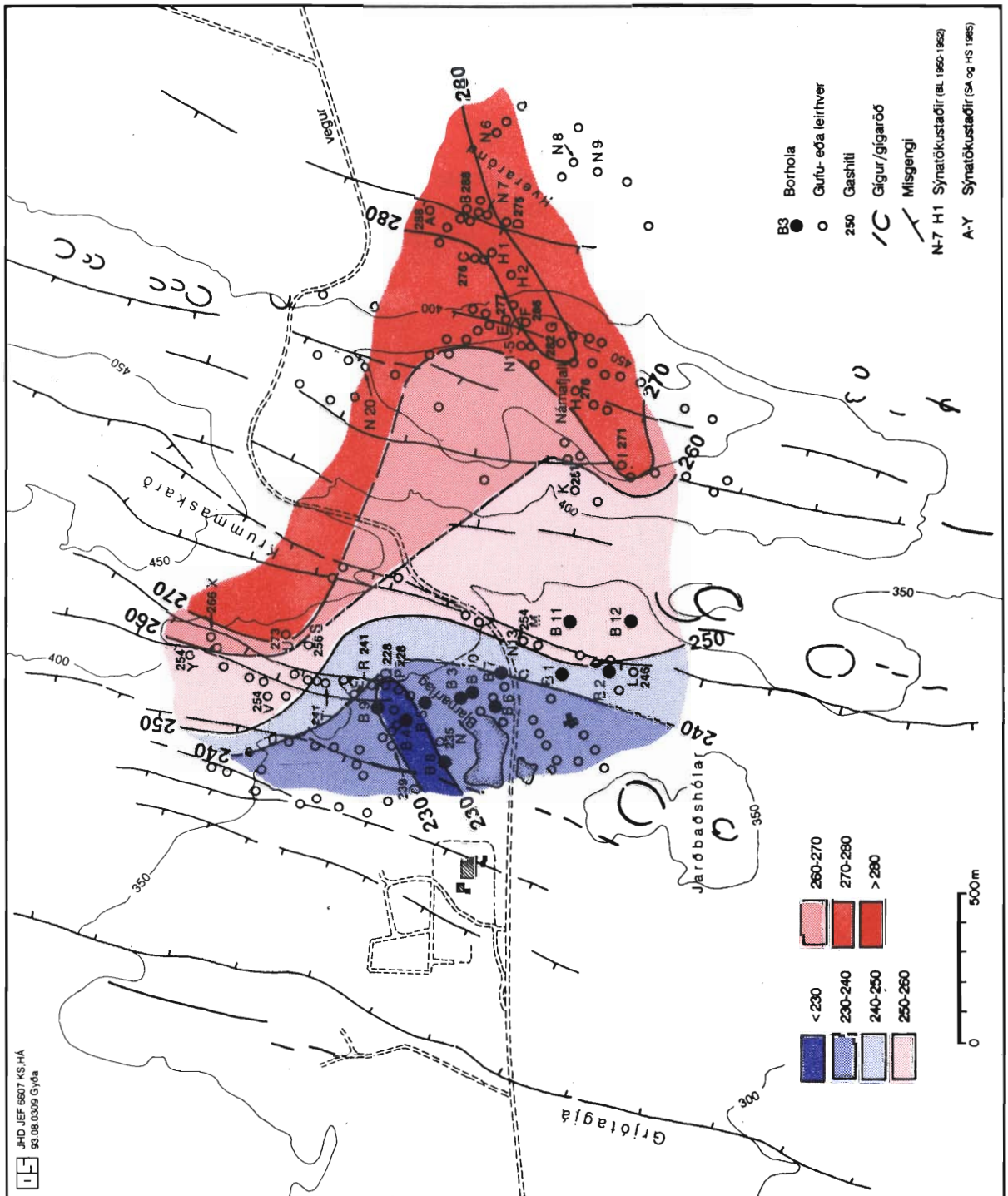
Sýni	1973*		1983	
	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	$\delta^{18}\text{O}$
Háhitaholur				
B-4	-96	-11,6	-94	-11,6
B-5	-94	-12,2		
B-6	-99	-11,3		
B-7	-96	-9,9		
B-8	-101	-11,7		
B-9	-96	-11,4		
B-11			-100	-8,8
B-12			-100	-9,5
Uppsprettur				
I			-88	-11,3
II			-91	-12,0
III			-91	-12,5
Grjótagjá			-92	-11,4
Stóragjá			-88	-11,6
Grunnar holur				
Kísiliðjan			-87	-11,1
Reykjahlíð			-88	-11,8
Hitaveita Reykjahlíðar			-88	-11,9

* Bragi Árnason (1976). Aðrar niðurstöður frá Darling og Ármannsson (1989).

9. HEIMILDIR

- Axel Björnsson, Grímur Björnsson, Ásgeir Gunnarsson og Gunnar Þorbergsson, 1985. Breytingar á landhæð við Kröflu 1974-1984. Orkustofnun OS-85019/JHD-05, 67 s.
- Ásgrímur Guðmundsson, Benedikt Steingrímsson, Sæþór L. Jónsson og Sverrir Þórhallsson 1989. Borholur í Bjarnarflagi. Orkustofnun, OS-89046/JHD-21 B, 87 s.
- Benedikt Steingrímsson og Gestur Gíslason 1977. Holubríf 5, 77-06-02, Orkustofnun, 14 s.
- Bragi Árnason 1976. Groundwater systems in Iceland traced by deuterium, Vísindafélag Íslendinga (Soc. Scient. Isl.), 236 s.
- Darling, W.G. og Halldór Ármannsson 1989. Stable isotopic aspects of fluid flow in the Krafla, Námafjall and Theistareykir geothermal systems of northeast Iceland. Chemical Geology, 76, 197-213.
- Fournier, R.O. og Potter, R.W.II. 1982. A revised and expanded silica (quartz) geothermometer. Geothermal Resources Council Bull., 11, 3-12.
- Freyr Þórarinnsson 1980. Krafla. Viðnámsmælingar með fjórþólaaðferð sumarið 1979. Orkustofnun OS-80013/JHD-07, 54 s.
- Friedman, I., Sigurgeirsson, Th. and Garðarsson, O. 1963. Deuterium in Iceland waters. Geochim Cosmochim. Acta, 27, 553-561.
- Guðmundur Guðmundsson, Guðmundur Pálmason, Karl Grönvold, Karl Ragnars, Kristján Sæmundsson og Stefán Arnórsson 1971. Námafjall - Krafla, áfangaskýrsla um rannsókn jarðhitasvæðanna. Orkustofnun, Jarðhitadeild, 114 s.
- Halldór Ármannsson 1977. Radonmælingar í Kröflu og Námafjalli árið 1977. Orkustofnun, Greinargerð, 16 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir 1988. Útfellingar í hitaveitum. Orkustofnun, OS-88067/JHD-34 B, 14 s.
- Jarðboranir ríkisins 1951. Efnagreiningar á hverum og laugum. Jarðboranir ríkisins, Reykjavík, 88 s.
- Jón Benjamínsson og Pétur Yngvason 1987. Krafla. Afl og eiginleikar gufu frá borholum í maí 1987. Orkustofnun OS-87023/JHD-14 B, 48 s.
- Jón Ólafsson 1978. Kvikasilfur og arsen í borholum við Kröflu og Námafjall. Náttúrufræðingurinn, 48, 52-57.
- van der Leeden, F., Troise, F.L. og Todd, D.K. 1990. The water encyclopaedia, second edition. Lewis Publishers, Chelsea, Michigan, USA, 808 s.
- Magnús Ólafsson og Hrefna Kristmannsdóttir 1989. The influence of volcanic activity on groundwater chemistry within the Námafjall geothermal system, North Iceland. Í: Miles, D.L. (ritstj.), Proceedings of the 6th International Symposium on Water-Rock Interaction, Balkema, Rotterdam, 537-540.

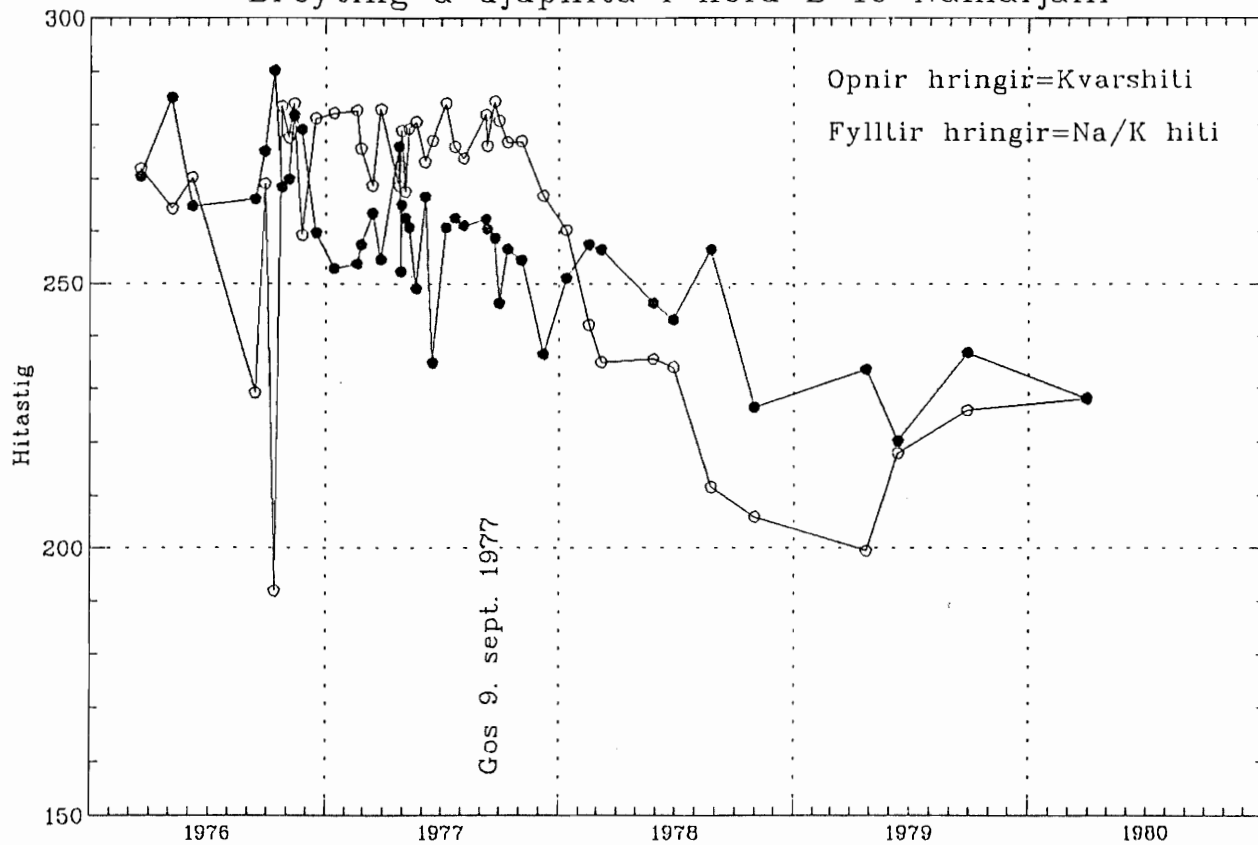
- Ómar Sigurðsson 1993. Jarðhitakerfið í Bjarnarflagi. Mat á hita, þrýstingi og afköstum. Orkustofnun, OS-93016/JHD-08 B, 45 s.
- Ragna Karlsdóttir 1993. Námafjall. TEM-viðnámsmælingar 1992. Samvinnuverk Orkustofnunar og Landsvirkjunar. Orkustofnun, OS-93022/JHD-12 B, 34 S.
- Stefán Arnórsson 1968. Jarðefnafræðiathugun á vatni úr borholum á háhitasvæðum, Orkustofnun, 16 s.
- Stefán Arnórsson 1978. Changes in the chemistry of water and steam discharged from wells in the Námafjall geothermal field, Iceland, during the Period 1970-76. Jökull, 27, 47-59.
- Stefán Arnórsson og Einar Gunnlaugsson 1985. New gas geothermometers for geothermal exploration - Calibration and application. Geochim Cosmochim. Acta, 49, 1307-1325.
- Stefán Arnórsson og Hörður Svavarsson 1985. Application of chemical geothermometry to geothermal exploration and development. Geoth. Resources Council Trans. 9, 293-298.
- Stefán Arnórsson, Einar Gunnlaugsson og Hörður Svavarsson 1983. The chemistry of geothermal waters in Iceland III. Chemical geothermometry in geothermal investigations. Geochim. Cosmochim. Acta, 47, 567-577.
- Tole, M.P., Halldór Ármannsson, P. Zhong-he og Stefán Arnórsson 1993. Fluid/mineral equilibrium calculations for chemical geothermometry. Examples from Iceland with special reference to well data. Geothermics, 22, 17-37.
- Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson 1988. Kröflustöð. Afköst og efnainnihald vatns og gufu í borholum og vinnslurás í maí 1988. Landsvirkjun Kröflustöð, 49 s.
- Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson 1989. Kröflustöð. Afköst og efnainnihald vatns og gufu í borholum og vinnslurás í maí 1989. Landsvirkjun, Kröflustöð, 51 s.
- Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson 1990. Kröflustöð. Afköst og efnainnihald vatns og gufu í borholum og vinnslurás í maí 1990. Landsvirkjun, Kröflustöð, 56 s.
- Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson 1991. Kröflustöð. Afköst og efnainnihald vatns og gufu í borholum og vinnslurás í maí 1991. Landsvirkjun, Kröflustöð, 54 s.
- Trausti Hauksson og Jón Benjamínsson 1992. Kröflustöð. Afköst og efnainnihald vatns og gufu í borholum og vinnslurás í apríl 1992. Landsvirkjun, Kröflustöð, 50 s.
- Verkfræðistofa Guðmundar og Kristjáns hf. 1993. Jarðvarmavirkjun í Bjarnarflagi. Frumáætlun. Áfangaskýrsla Landsvirkjun, 36 s.
- de Zeeuw, E. og Gestur Gíslason 1988. The effect of volcanic activity on the groundwater system in the Námafjall geothermal area, NE Iceland. Orkustofnun, OS-88042/JHD-07, 39 s.
- Þóroddur F. Þóroddsson og Guttormur Sigbjarnarson 1983. Kísiliðjan við Mývatn. Grunnvatnsrannsóknir. Orkustofnun, OS-83118/VOD-10, 40 s.



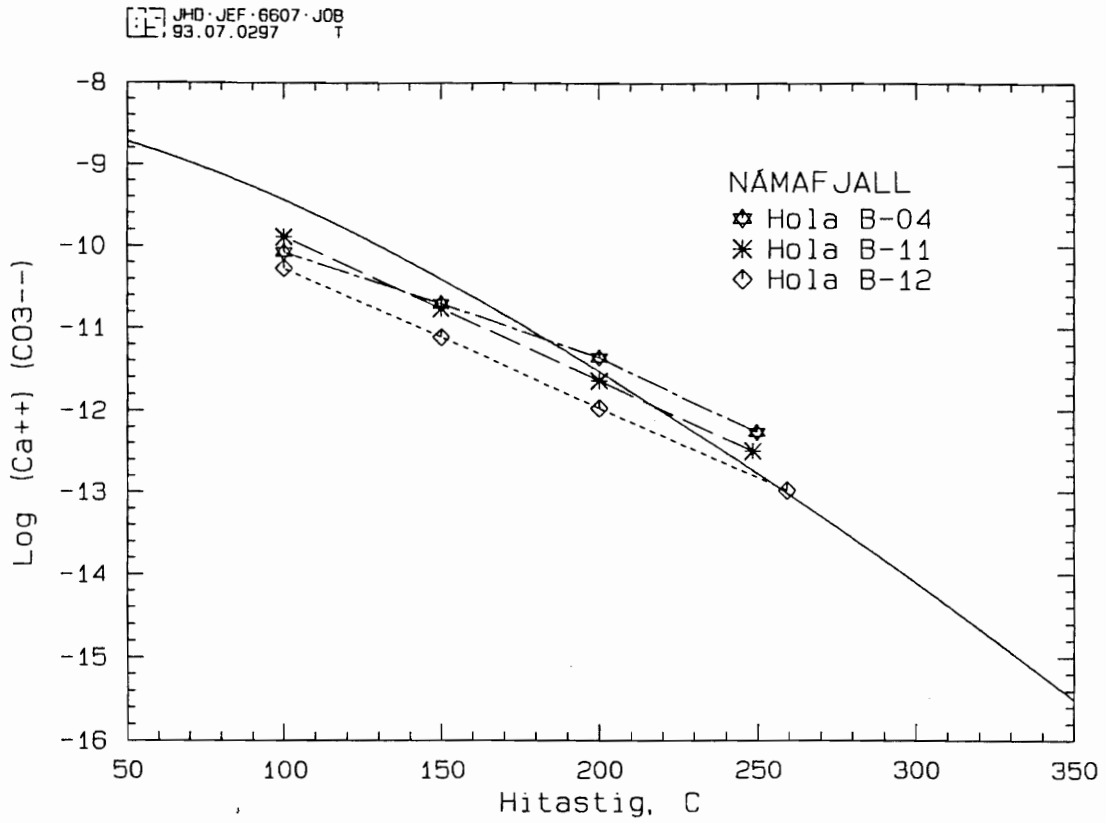
Mynd 1. Gashiti gufu úr gufuaugum í Námafjalli (Stefán Arnórsson og Hörður Svavarsson 1985).

27 Jul 1993 GSV
TimePlot V1.1

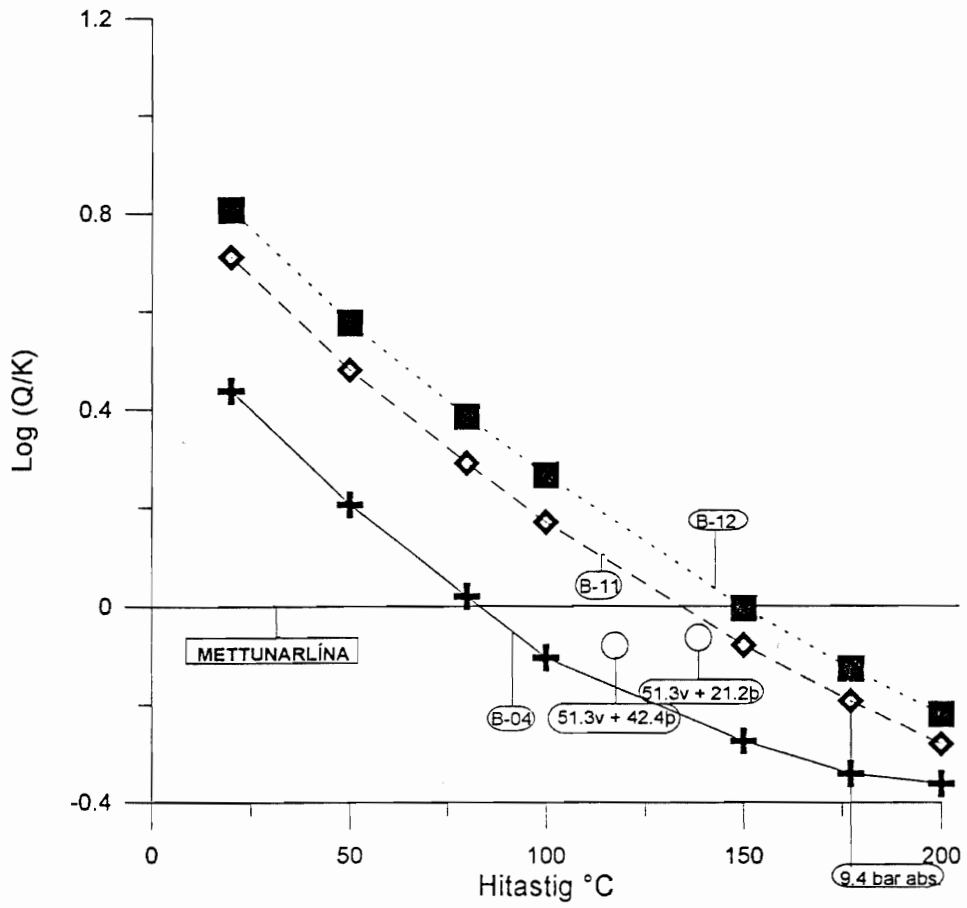
Breyting á djúphita í holu B-10 Námafjalli



Mynd 2. Breyting á djúphita í holu B-10.

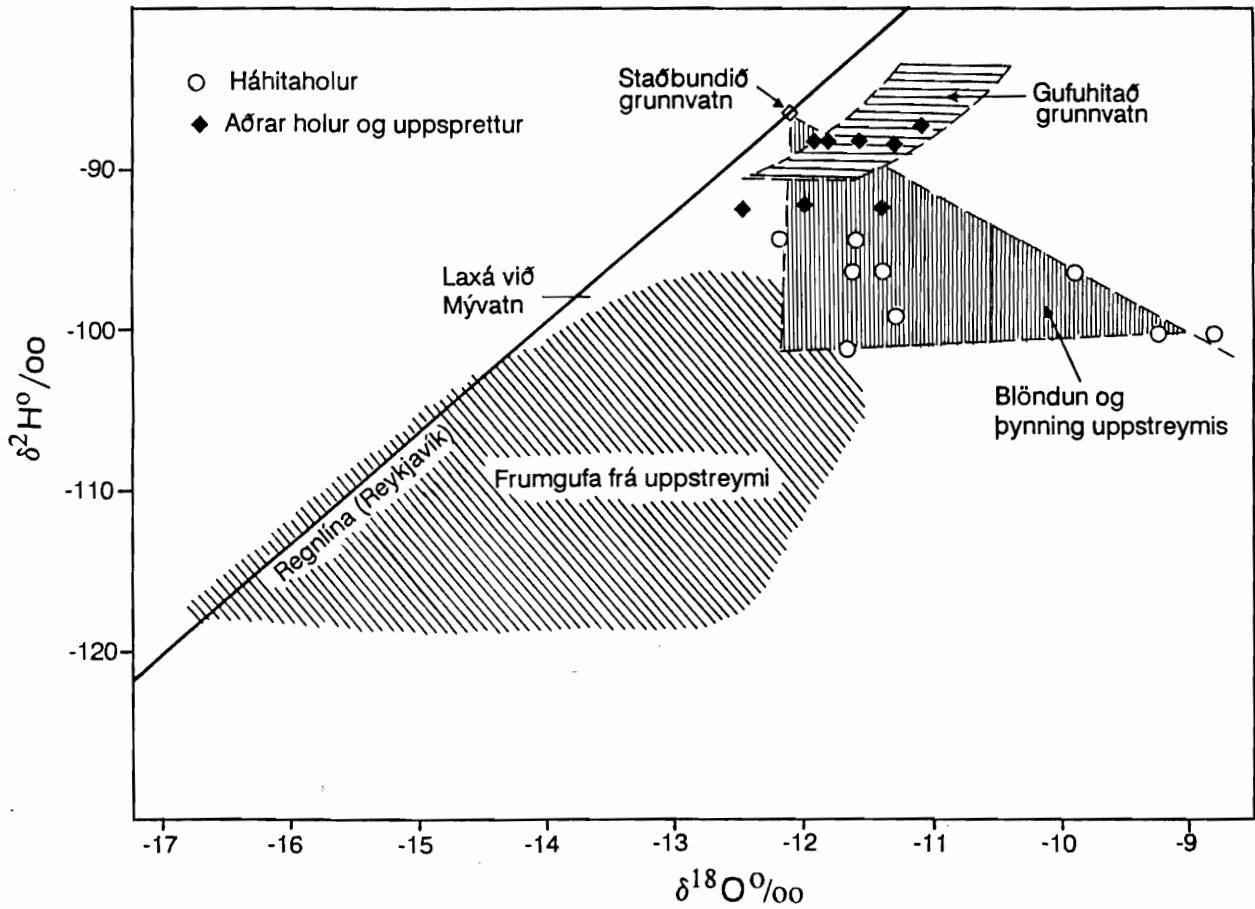


Mynd 3. Námafjall. Leysnimargfeldi kalsíts við suðu vökva úr þremur holum (B-4, B-11 og B-12) í 100°C. Jafnvægisferillinn er heildreginn.



Mynd 4. Kísilvísir (log Q/K) fyrir sýni frá 1992 úr holum B-04, B-11 og B-12; ásamt blöndu af skiljuvatni og þéttivatni í mismunandi hlutföllum reiknað fyrir sýni úr B-12 frá 1989.

JHD JEF 6607 HÁ
93.06.0247 AÁ



Mynd 5. Hlutföll tvívetnis og súrefnis-18 samsætna í vökva úr holum og uppsprettum í Námafjalli. Sýnd er líkleg samsetning frumgufu, blandaðrar, þynntrar gufu og gufuhitaðs grunnvatns (Darling og Ármannsson 1989).