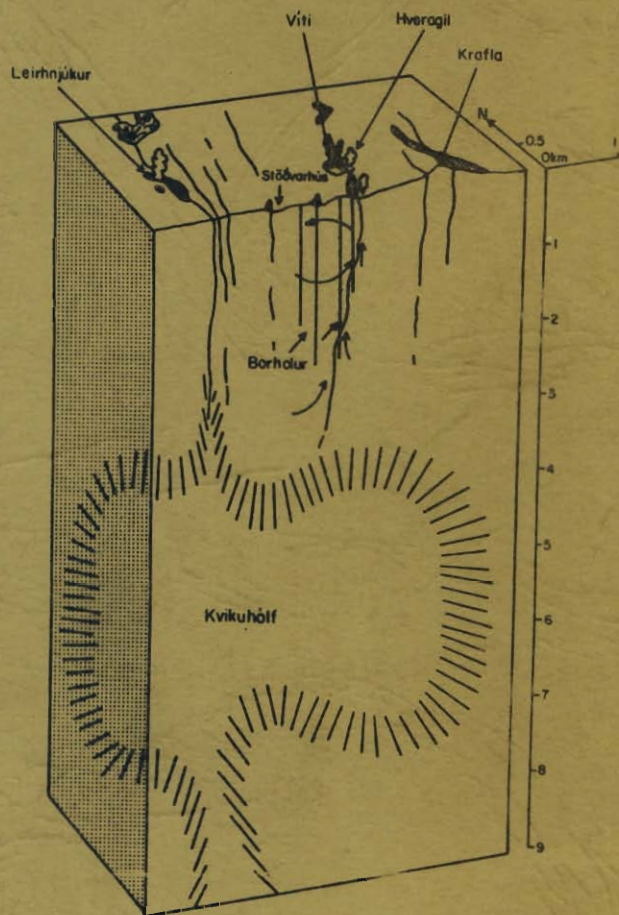


ORKUSTOFNUN
JARÐHITAEILD

KRAFLA

HITAÁSTAND OG GASTEGUNDIR Í JARÐHITAKERFINU

GESTUR GÍSLASON
HALLDÓR ÁRMANNSSON
TRAUSTI HAUSSON



OSJHD-7846

SEPT. 1978

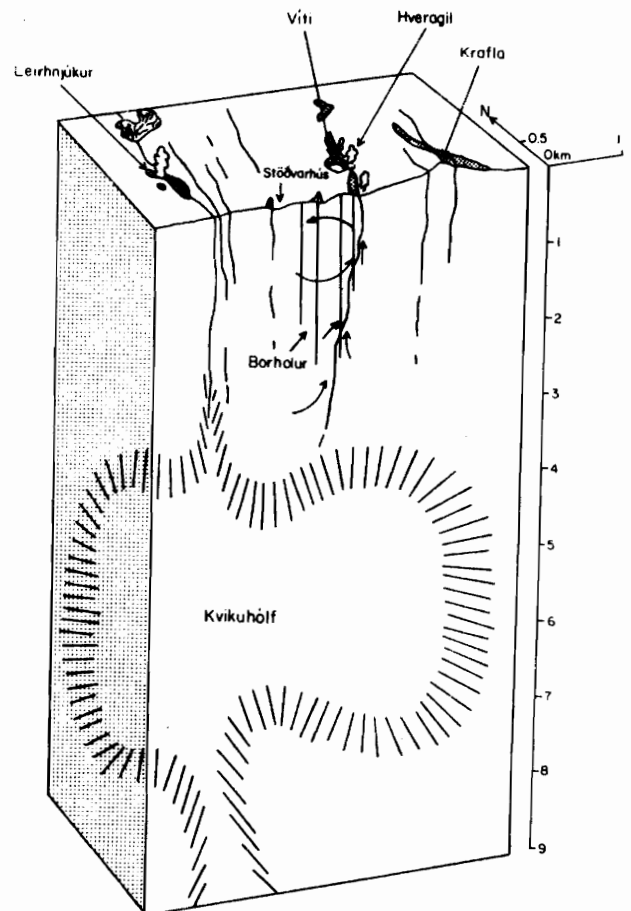


ORKUSTOFNUN
JARÐHITAEILD

KRAFLA

HITAÁSTAND OG GASTEGUNDIR Í JARÐHITAKERFINU

GESTUR GÍSLASON
HALLDÓR ÁRMANNSSON
TRAUSTI HAUSSON



EFNISYFIRLIT:

	Bls.
1. <u>Inngangur</u>	1
2. <u>EFRI HLUTI</u>	3
2.1 Almennt um efri hluta	3
2.2 Áhrif hita og suðu á uppleyst gas	4
2.3 Dreifing gastegunda	6
2.4 Kísilhiti, alkalíhiti	8
2.5 Kvikasilfur	9
2.6 Radon	11
3. <u>NEÐRI HLUTI</u>	13
3.1 Almennt um neðri hluta	13
3.2 Þrýstingur, hiti og dýpi æða	14
3.3 Varmainnihald og hlutur neðri æða af heildarrennsli	16
3.4 Styrkur CO ₂ og áhrif þess á þrýsting	20
3.5 Gasstyrkur, ástand og streymi jarðhitavökvans	22
3.6 Kvikasilfur	28
3.7 Radon	29
4. <u>YFIRBORD</u>	31
4.1 Almennt	31
4.2 Hlutföll gastegunda í gufu	33
4.3 Styrkur gastegunda í gufu	34
5. <u>NIÐURSTÖÐUR</u>	36
<u>VIÐAUKAR</u>	40
1. Reikningsaðferðir	40
2. Áhrif þrýstifalls í nágrenni holu á niðurstöður reikninga.	44

MYNDASKRÁ

- 1.1 Breyting á hlutfallinu N_2/H_2S með tíma
- 2.1 Leysni rokgjarnra efna í vatni á hitastigsbilinu 100-370°C
- 2.2 Einfölduð mynd af hringstreymi í efri hluta
jarðhitakerfisins við Kröflu
- 2.3 Gas í efri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu
- 2.4 Gas í efri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu
- 2.5 H_2/H_2S hlutfall í djúpvatni í holum KW-2, KG-3, KG-8,
KJ-9, KG-10 og KJ-11
- 2.6 CO_2/H_2S hlutfall í djúpvatni í holum KW-2, KG-8, KJ-9 og KJ-11
- 2.7 Heildargasmagn í djúpvatni í holum KW-2, KG-8, KJ-9 og KJ-11
- 2.8 Samanburður á kísilhita, alkalíhita og mældum hita
- 3.1 Staðsetning helstu æða í borholum við Kröflu
- 3.2 Hugsanlegur skurðflötur helstu æða neðri hluta
og sprungu eftir Hveragili
- 3.3 Líklegt þrýstiástand í neðri hluta Kröflusvæðisins
- 3.4 Líklegur hiti í neðri hluta Kröflusvæðis
- 3.5 Hitastig í neðri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu
- 3.6 Varmainnihald og hlutur neðri æða KW-1, hitastig $\approx 300^\circ C$
- 3.7 Varmainnihald og hlutur neðri æða KJ-6, hitastig $\approx 320^\circ C$
- 3.8 Varmainnihald og hlutur neðri æða KJ-7, hitastig $\approx 340^\circ C$
- 3.9 Varmainnihald og hlutur neðri æða KJ-9 (eftir dýpkun)
hitastig neðri æða $\approx 300^\circ C$ og efri æða $\approx 250^\circ C$
- 3.10 Varmainnihald og hlutur neðri æða KG-10, hitastig $\approx 340^\circ C$
- 3.11 Varmainnihald og hlutur neðri æða KJ-11, hitastig $\approx 340^\circ C$
- 3.12 Varmainnihald innstreymis úr neðri hluta
jarðhitakerfisins í Kröflu
- 3.13 Varmainnihald innstreymis í holur úr neðri hluta
jarðhitakerfisins við Kröflu
- 3.14 Rennsli úr neðri æðum hola í Kröflu
- 3.15 Styrkur koldíoxíðs í neðri æðum KW-1, KJ-6 og KJ-7
- 3.16 Styrkur koldíoxíðs í neðri æðum KJ-9, KG-10, KJ-11
- 3.17 Styrkur koldíoxíðs í innstreymi úr neðri hluta
jarðhitakerfisins í Kröflu

- 3.18 Suðuprýstingur innstreymis úr neðri hluta jarðhitakerfisins í Kröflu
- 3.19 Styrkur CO₂ í neðri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu
- 3.20 Styrkur H₂S í neðri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu
- 3.21 Styrkur H₂ í neðri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu
- 3.22 H₂/H₂S-hlutfall í neðri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu
- 3.23 CO₂/H₂S-hlutfall neðri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu
- 3.24 Streymi í neðri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu
- 3.25 Styrkur Hg í neðri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu
- 3.26 Styrkur radons í neðri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu
- 4.1 Jarðhiti á Kröflusvæði
- 4.2 Styrkur CO₂ í gufu úr hverum á Kröflusvæði
- 4.3 Gashlutföll í sýnum úr borholum og gufuaugum við Kröflu
- 4.4 Hlutföll gastegunda í hverum á Kröflusvæði
- V.1 Flæðirit fyrir blásandi borholur.
- V.2 Aðstreymi að borholu, er vinnur vatns- gufublöndu úr "sjóðandi" bergi

ÁGRIP

Í þessari skýrslu er fjallað um styrk og hlutföll gastegunda í jarðhitakerfinu við Kröflu. Sýnt er fram á streymi vatns og gufu í jarðhitakerfinu og áhrif kvikuessa á neðri hluta kerfisins.

Sett er fram líkan af þeim hluta jarðhitakerfisins, sem hefur verið borað í, byggt á dreifingu og hlutföllum gastegunda, hitamælingum og aflmælingum.

1. INNGANGUR

Í þessari skýrslu er fjallað um dreifingu og hlutföll gastegunda í þeim hluta jarðhitakerfisins, sem borað hefur verið í. Auk þess er fjallað um yfirborðsjarðhita.

Á grundvelli hitamælinga í borholum og fleiri athugana hefur verið sett fram líkan af uppbyggingu þess hluta jarðhitakerfisins sem borað hefur verið í. Er jarðhitakefinu skipt í tvo hluta, efri hluta, sem er 210°C heitt vatnskerfi og neðri hluta, sem er blandað kerfi vatns og gufu og hitastig 300°C eða hærri (1). Þessi skipting jarðhitakerfisins er lögð til grundvallar í þessari skýrslu.

Holum í Kröflu má skifta í tvo hópa eftir efnasamsetningu. Annars vegar eru holur með lágu heildargasmagni og kísilhita 200-225°C. Varmainnihald samsvarar þessum kísilhita. Hins vegar eru gasríkar holur, þar sem varmainnihald er meira en svarar til kísilhitans. Talið er víst, að fyrrnefndu holurnar taki vatn úr efri hluta jarðhitakerfisins en hinar taki vatni og gufu úr báðum hlutum.

Miklum fjölda sýna hefur verið safnað í Kröflu á undanförunum árum, og byggir þessi skýrsla á þeim. Hefur þeim verið safnað á þann hátt, sem lýst er í skýrslu Orkustofnunar OS JHD 7552 (2).

Þegar holu er hleypt í blástur eftir borun, þarf hún að blása nokkurn tíma, áður en marktæk sýni af djúpvatni fást. Á mynd 1.1 er sýnt hyernig hlutfallið N_2/H_2S breytist ört fyrst eftir að holunni er hleypt í blástur. Þetta mun stafa af því, að dælt er niður miklu magni af köldu vatni, mettuðu andrúmslofti, meðan á borun stendur. Þetta vatn er að skila sér upp aftur fyrst í stað og marktæk sýni af djúpvatni fást því ekki, fyrr en holan hefur blásið í 1-2 mánuði. Fyrstu sýni er því óráðlegt að nota við túlkun á dreifingu gastegunda.

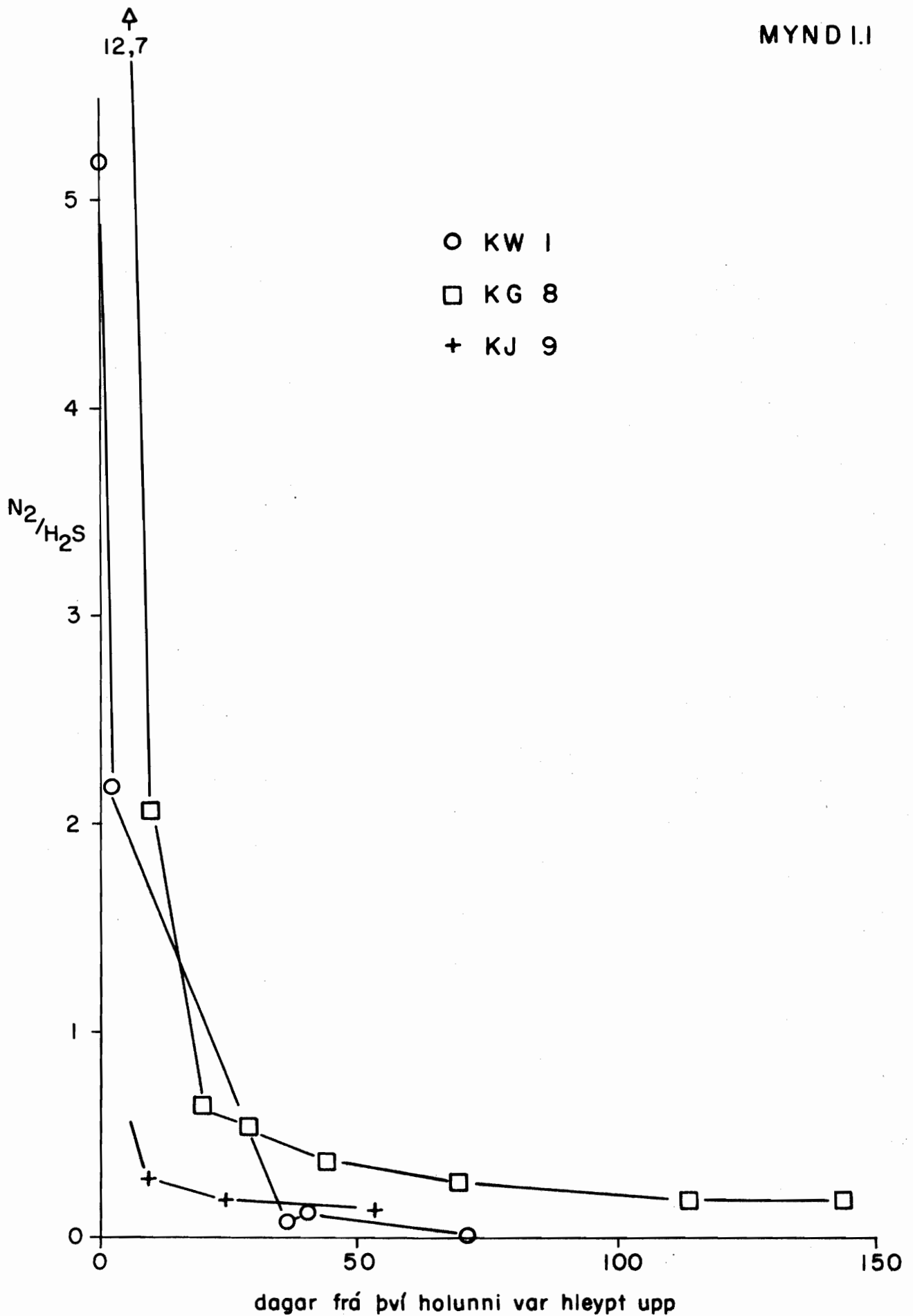
Styrkur gastegunda er mikilvægur þáttur í túlkun á efnasamsetningu djúpvatns. Gasfasinn er mældur með Orsat-mæli og Tutwilerbyrettu. Með þessum tækjum eru mæld eftirtalin efni: koldíoxíð (CO_2), brennisteinsvetni (H_2S), súrefni (O_2), vetni (H_2) og metan (CH_4). Það, sem

á vantar, að summan sé 100%, er talið vera köfnunarefni (N_2). Þessi aðferð er ekki góð til ákvörðunar en fæst ekki bæt看 fyrir en stofnunin eignast gasgreini (gaschromatograf). Þess vegna verður að taka tölum um styrk köfnunarefnis með fyrirvara.



Breyting á hlutfallinu N_2/H_2S með tíma

MYND I.I



2. EFRI HLUTI

2.1 Almennt um efri hluta

Til umræðu hér á eftir eru þær holur, sem álitid er, að dragi vatn eingöngu úr efri hlutanum þ.e. KW-2, KG-8 og **KJ-9**. Þá eru til sýni af efrihlutavatni holu KJ-11.

Hola KG-3 fellur vel að líkani því sem sett er fram hér á eftir. Hún hefur þó hærri kísilhita en holur í efri hluta, en varmainnihald er óþekkt. Eftir gosið í Leirhnúk 1975 jókst gasmagnid í holunni verulega (3) og virðist hún þá jafnframt hafa fengið eitthvað úr neðri hluta. Helstu vatnsæðar í holunni virtust vera á 700-800 m dýpi, en einnig voru æðar á rúmlega 1600 m dýpi, sem ekki voru talðar gefa mjög mikið. Sýni úr KG-3 fyrir gos eru því tekin með.

Efnasamsetning vatns og gufu í KG-10 breyttist verulega, samhliða örri rennslisminnkur, er varð eftir að hún byrjaði að blása. Þá minnkaði munur milli kísilhita og mælds varmainnihalds. Holan virðist þó fá eitthvað úr neðri hluta, en mismikið, enda er gasmagn nokkuð mikið. Eitt sýni, safnað fyrir hreinsun, er tekið með í umræðum og myndum, en það virðist nær eingöngu úr efri hluta.

Kísilhiti og varmainnihald hola KW-1, KJ-6 og KJ-7 er í öllum tilfellum mun herra auk þess sem gasmagn í þeim er mjög mikið. Þessar holur fá ótvírætt vatn og gufu úr báðum hlutum. Hola KJ-9 virðist eftir dýpkun draga inn vatn, sem er kringum 300°C. Vegna þessa háa hitastigs verður að telja hana tilheyrja neðri hluta eftir dýpkun. Um þessar holur er fjallað í kafla 3.

2.2 Áhrif hita og suðu á uppleyst gas

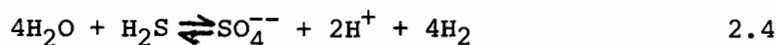
Sum efni hafa tilhneigingu til að leita frekar í gufufasa en vatnsfasa (4). Dreifingu rokgjarnra efna milli gufu og vatns er lýst með líkingunni

$$\frac{m_l}{P_g} = K \quad 2.1$$

K er dreifistuðull, m_l táknar massahlut gastegundar í vatnsfasa og P_g táknar hlutþrýsting gastegundar í gufufasa.

Þau reikulu efni, sem fjallað er um hér á eftir, eru köfnunarefni (N_2), koldíoxíð (CO_2), brennisteinsvetni (H_2S) og vetni (H_2).

Á mynd 2.1 er sýnt samband K og hitastigs fyrir koldíoxíð, brennisteinsvetni, köfnunarefni og vetni. Þar sést að leysni gastegunda er mjög háð hita, sérstaklega við hærri hitastig en $200^\circ C$. Einnig eru flest þau efnahvörf milli gastegunda og vatns og bergs, sem til greina koma, háð hita og hefur því breyting á hitastigi áhrif á slík jafnvægi og þar af leiðandi á dreifingu gastegunda. Eru gashlutföll því háð hita djúpvatnsins. Sem dæmi um efnahvörf, er gastegundir taka þátt í, mætti nefna



Öll þessi jafnvægi leita til hægri við aukinn hita.

Við gufumyndun, er vatn sýður í berggrunni, leitar gas í gufufasa, en hitastig vatnsins fellur við suðuna. Suða veldur því mikilli minnkun á styrk gastegunda í vatni.

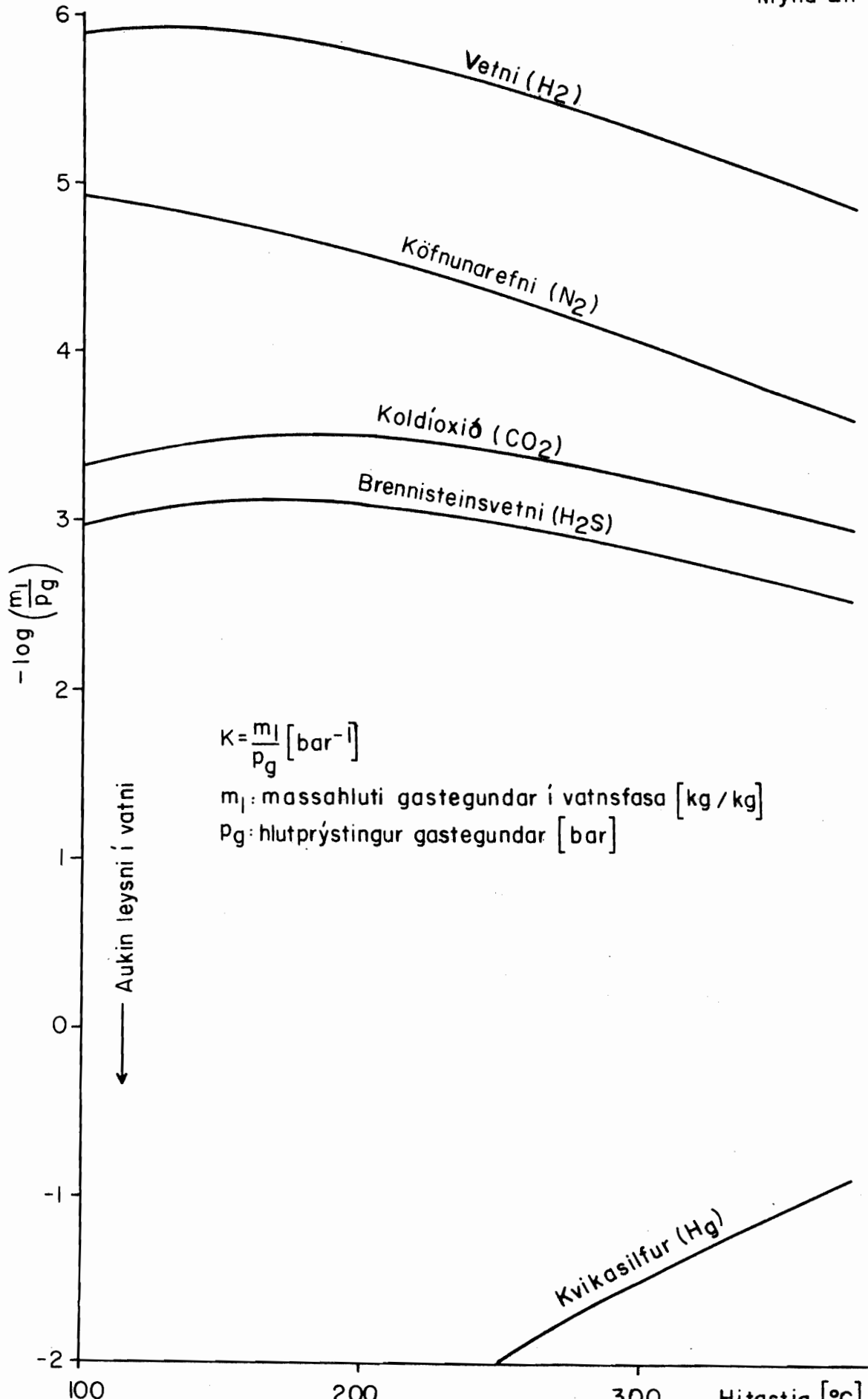
Á mynd 2.1 sést, að við sama hitastig er K_{CO_2} lægra en $K_{\text{H}_2\text{S}}$, sem þýðir, að við gufumyndun minnkar styrkur CO_2 örrar í vatni en styrkur H_2S . Þetta hefur í för með sér að $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ í vatni lækkar við aukna gufumyndun. Sama gildir fyrir K_{H_2} og K_{N_2} og rjúka bæði þessi efni nánast alveg yfir í gufufasa við suðu. Af þessu leiðir að $\text{H}_2/\text{H}_2\text{S}$ í vatni lækkar einnig við aukna gufumyndun.

Á mynd 2.2 er sýnt mjög einfaldað líkan af hringstreymi í jarðhita-svæði. Á botni svæðisins er upphitun og einnig bætast gastegundir að neðan í vatnskerfið. Þetta er aðallega koldíoxíð (CO_2), brenni-steinsvetni (H_2S) og vetni (H_2). Vegna hitunar myndast hringstreymi; vatnið streymir upp, sýður og afgangast. Kalt, afgangað vatnið blandast köldu grunnvatni og sígur niður. Með grunnvatninu bætist köfnunar-efni (N_2) í jarðhitakerfið, en hverfur þaðan fljótlega vegna lítillar leysni í vatninu.

Hringstreymi getur einnig myndast, ef vökvi og gas streymir upp gegnum svæðið af litlum bletti. Uppstreymismiðja verður þá yfir þeim bletti og hringstreymi þvingað. Dreifing gastegunda verður þá í stórum dráttum sú sama og í frjálsum hringstreymi.



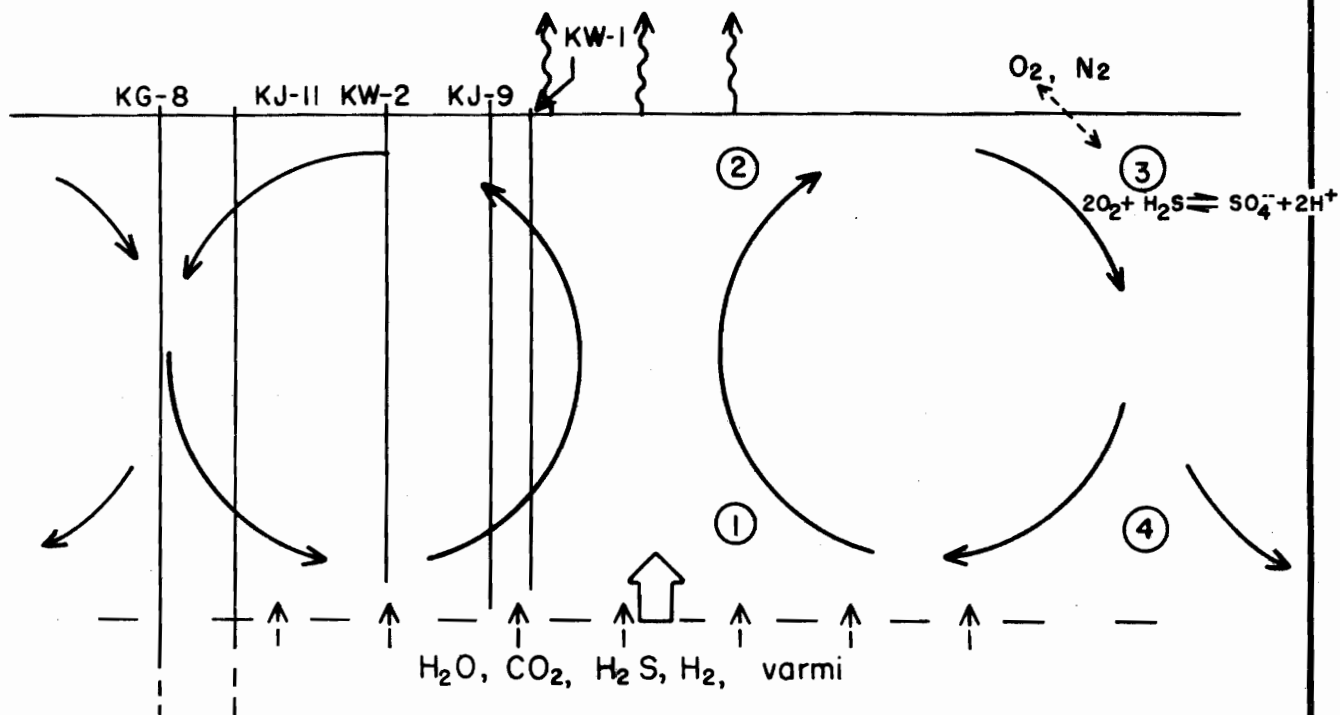
Mynd 2.1





Einfölduð mynd af hringstreymi
í efri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu

MYND 2.2



Skýringar:

- ① Upphitun, uppstreymi
- ② Suða, afgösun
- ③ Blöndun við kalt grunnvatn
- ④ Niðurstreymi, upphitun

Dreifing gastegunda:

CO₂ / H₂S: ④ < ① > ② > ③

H₂ / H₂S: ④ < ① > ② > ③

N₂ / H₂S: ④ > ① > ② < ③ < ④

Heildar gas: ④ < ① > ② > ③

2.3 Dreifing gastegunda í efri hluta jarðhitakerfisins

Á myndum 2.3 og 2.4 eru sýnd hlutföll og styrkur gastegunda í holum, er draga vatn úr efri hluta jarðhitasvæðisins við Kröflu. Þegar dreifingin er athuguð kemur í ljós greinilegur munur á H_2/H_2S hlutfalli í holum vestarlega á vinnslusvæðinu og holum nær Hveragili. Þetta má reyna að skýra á a.m.k. þrjá vegu.

Einn möguleiki er, að hlutfallið ráðist af hita djúpvatns og styrkur gastegunda sé í jafnvægi við berg og vatn. Samkvæmt því ætti hiti að vera hærri nálægt Hveragili og H_2/H_2S -hlutfallið þar af leiðandi hærra. En ef mældur hiti, kísilhiti og alkali-hiti er skoðaðir (kafla 2.4) sést ekki sá hitamismunur milli hola, er gæti skýrt þennan mun á H_2/H_2S hlutfalli. Þetta eitt sér er því talin fremur ólíkleg skýring.

Annar möguleiki er, að H_2/H_2S hlutfallið stjórnist af gufumyndun (suðu), en þá væri djúpvatn í holum vestar á svæðinu meira afgasað en djúpvatn í holum nær Hveragili. Hugsanlega eru báðar þessar gastegundir komnar frá hitagjafa jarðhitakerfisins, e.t.v. kvikuinnskotum. Gasið berst þá inn í efri hluta að neðan, annað hvort á afmörkuðum stað eða jafndreift um svæðið. Einnig er hugsanlegt, að gasið leysist úr bergi efri hlutans vegna ójafnvægis milli bergs og vatns, er orsakast af suðu og afgösun hringstreymisvökvans.

Þriðji möguleikinn er, að breytilegt H_2/H_2S hlutfall orsakist af innstreymi vetnisríks vökva austarlega á svæðinu, er valdi ójafnvægi milli bergs og vatns. Gasahlutföll ættu þá að nálgast jafnvægisástand því lengur sem vatnið streymir í bergi. Djúpvatn vestarlega á svæðinu væri þá nær jafnvægi við berg en vatn undir Hveragili.

Ekki verður frekar fjallað um, hver þessara tilgáta er líklegust eða hvort um sé að ræða samspil þeirra allra. Til þess þarf að taka inn í dæmið hita og þrýstimælingar ásamt mælingum á lekt bergsins.

Á mynd 2.5 er sýnt hvernig H_2/H_2S hlutfallið dreifist landfræðilega á borsvæðinu við Kröflu. Þar sést, að uppstreymismiðjan (minnst afgösun djúpvatns) er vestur af holu KJ-9 í námunda Hveragils, ef um er að ræða hringstreymi, en holur KG-8 og KJ-11 eru nær jaðri þess. Einnig sést, að gasríkt innstreymi streymir inn undir Hveragil og síðan til vesturs, ef ekki er um hringstreymi að ræða.

Á myndum 2.6 og 2.7 er einnig birt dreifing hlutfallsins $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ ásamt heildar gasmagni í djúpvatni. Þar kemur fram svipuð breyting en munur á hæsta og lægsta gildi er þó minni en fyrir $\text{H}_2/\text{H}_2\text{S}$ hlutfallið og myndirnar því ekki eins skýrar. Líklega er á þessu svipuð skýring og gefin var fyrir $\text{H}_2/\text{H}_2\text{S}$ hlutfallið.

Eins og sagt er í inngangi er hola KG-10 talin fá áfram einhverja gufu úr neðri hluta Kröflusvæðisins þótt hún hafi dalað, en það þýðir, að styrkur CO_2 í heildarrennsli holunnar er mikill miðað við efri hluta holunnar. Þetta raskar $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ hlutfalli verulega og eykur gasmagn í heildarrennsli holunnar, en hefur minni áhrif á $\text{H}_2/\text{H}_2\text{S}$ hlutfall. Einnig kemur fram í kafla 2.1, að gasaukning varð í djúpvatni samfara gosinu í Leirhnjúki 1975, mest á koldíoxíði (CO_2). Þetta veldur því, að sýni úr KG-3, tekin fyrir gos, eru ekki sambærileg við sýni tekin úr holum eftir gos sérstaklega hvað varðar $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ hlutfall og heildar gasmagn (3). Holum KG-3 og KG-10 er því sleppt á myndum 2.6 og 2.7 en hafðar með á mynd 2.5.

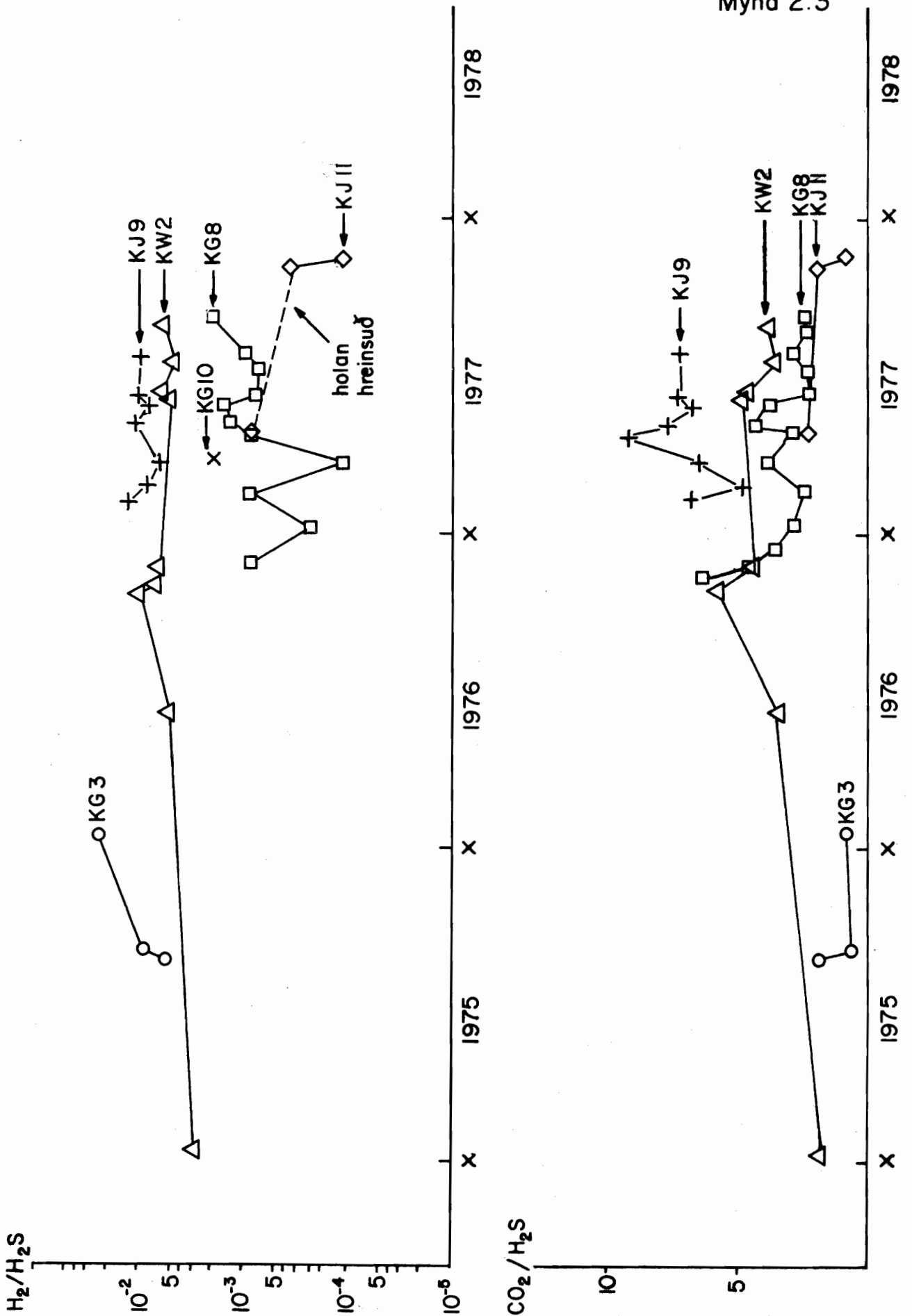
Þrátt fyrir að KW-1 sé grynsta hola á svæðinu er hún talin blandhola, er dregur vatn úr báðum hlutum kerfisins, og því sleppt að sinni. Þess ber að geta að hún fellur vel inn í mynd af gasdreifingu í efri hluta svæðisins.

Til að skýra mál okkar betur höfum við teiknað holur KW-2, KG-8, KJ-9 og KJ-11 inn á mynd 2.2 og er þar reynt að sýna hvernig þær raða sér innbyrðis í hringstreymislíkani.

Eins og sýnt er á mynd 2.2 er talið að andrúmsloft berist með köldu grunnvatni inn í hringstreymi við jaðar jarðhitasvæða. Brennisteinsvetni (H_2S) afoxar súrefni (O_2) loftins, sem hverfur strax, en köfnunarefni berst áfram þar til hiti verður það hár, að köfnunarefnið rýkur úr vatninu og berst til yfirborðs. Ef þessi kenning er rétt ætti $\text{N}_2/\text{H}_2\text{S}$ hlutfall að vera hæst við jaðar hringstreymis jarðhitasvæða en lækka er nær dregur uppstreymismiðju. Það kemur og í ljós að $\text{N}_2/\text{H}_2\text{S}$ hlutfall hefur mælst hæst í holu KG-8 en lægra í öðrum holum (sjá mynd 2.4). Þessum niðurstöðum ber þó að taka með varúð, því að $\text{N}_2/\text{H}_2\text{S}$ hlutfallið lækkar ört eftir að holum er hleypt í blástur eins og sagt er í inngangi, og er erfitt að segja til hvenær hola hefur náð $\text{N}_2/\text{H}_2\text{S}$ "jafnvægi". Einnig er köfnunarefnisgreining mjög ónákvæm með þeim tækjakosti, sem nú er notaður.

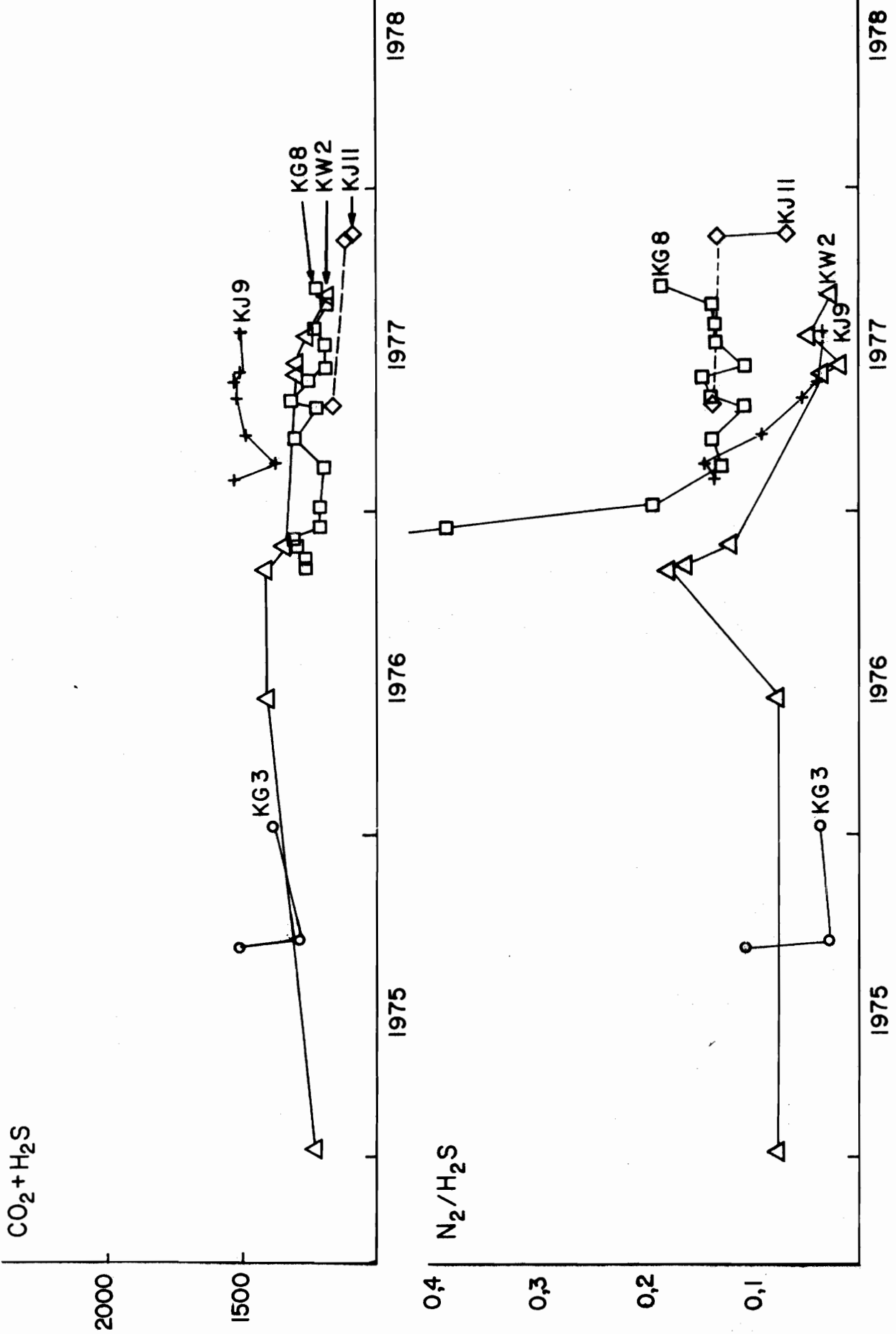


Mynd 2.3





Mynd 2. 4





ORKUSTOFNUN

Jarðhitadeild

H₂/H₂S hlutfall í djúpvatni í holum

KW-2, KG-3, KG-8, KJ-9, KG-10 og KJ-11

(Tölur innan sviga eru mæld hlutföll í holum)

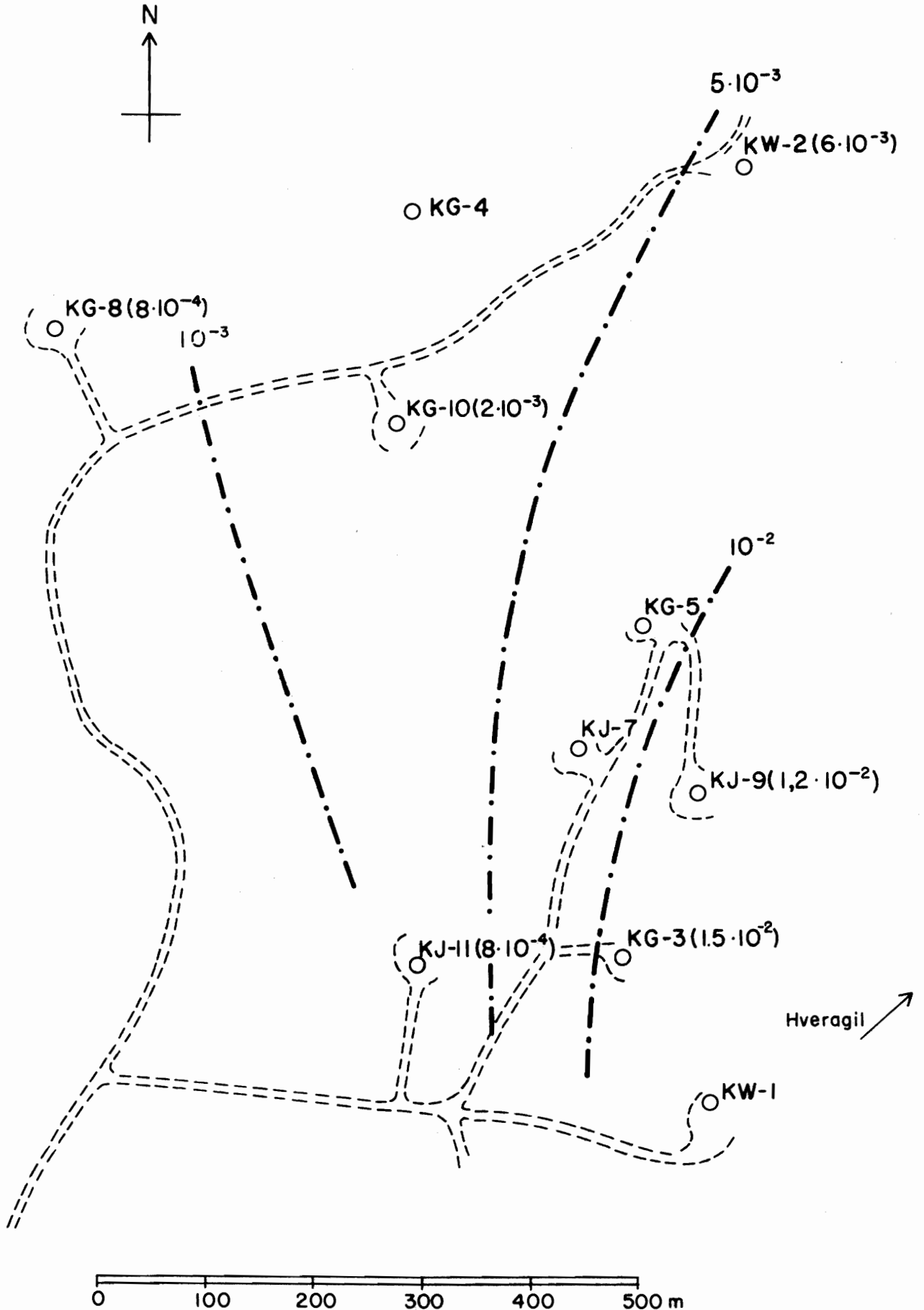
'77-10-15. T.H./Ó.D.

T. 444 T.244

Krafli Jarðefn.fr.

F. 16168

MYND 2.5





ORKUSTOFNUN

Jarðhitadeild

CO₂/H₂S hlutfall í djúpvatni í holum

KW-2, KG-8, KJ-9 og KJ-11

(Tölur innan sviga eru mæld hlutföll í holum)

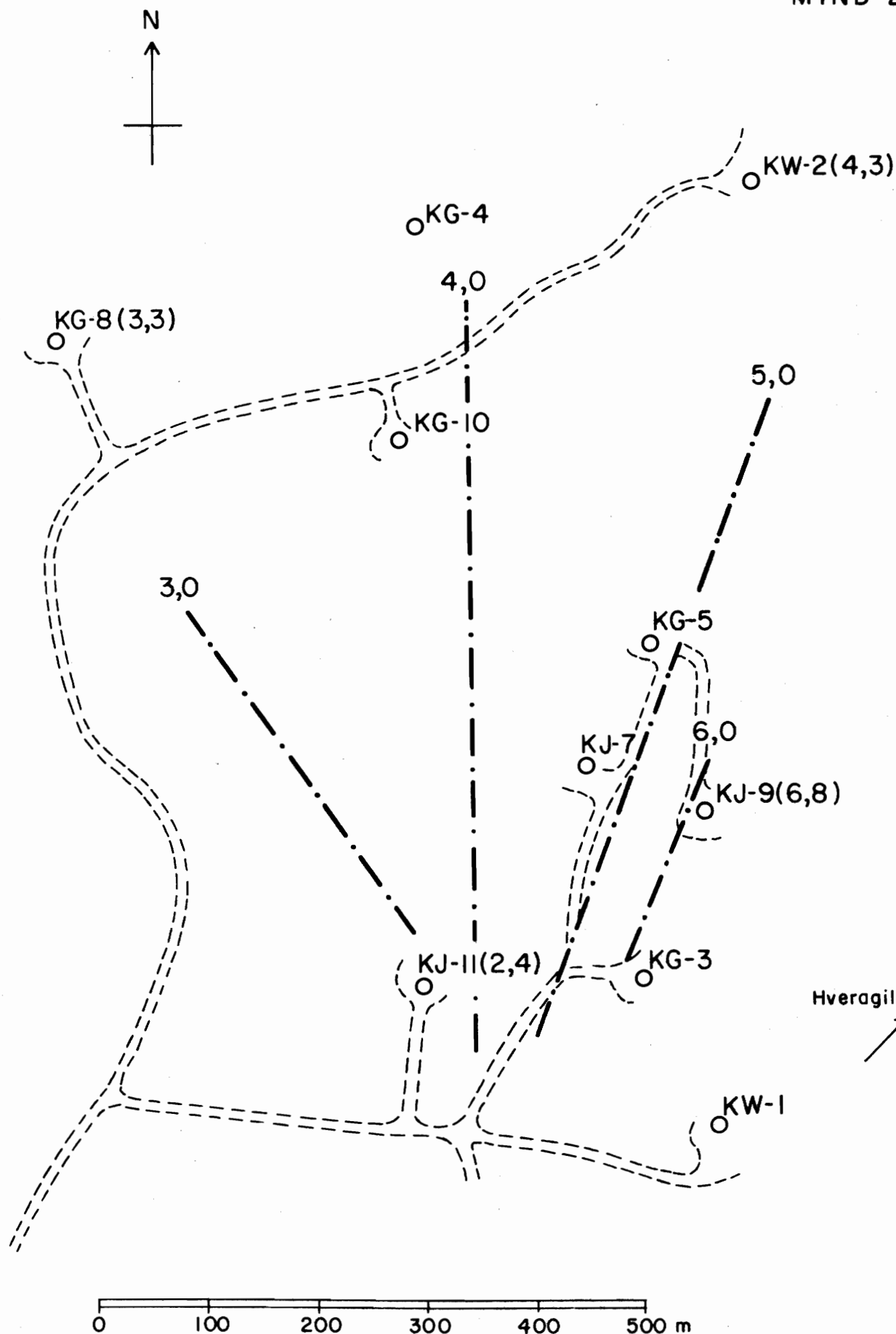
'77-10-15. T.H./Ó.D.

T. 445 T. 245

Krafla Jarðefn.fr.

F. 16169

MYND 2.6





ORKUSTOFNUN

Jarðhitadeild

Heildar gasmagn í djúpvatni í holum

KW-2, KG-8, KJ-9 og KJ-11

(Tölur innan sviga eru mæld gildi í holunum)

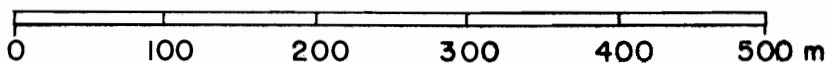
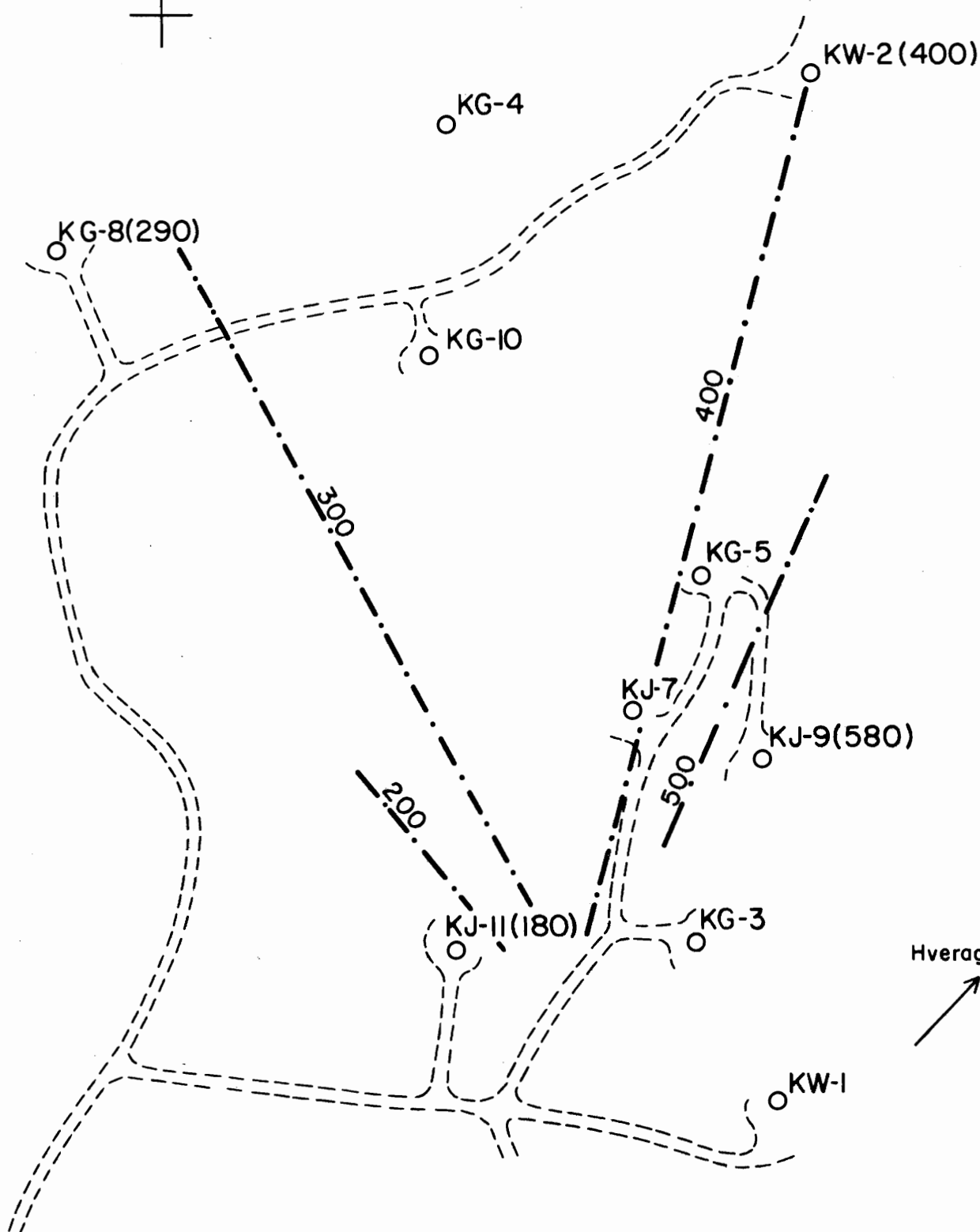
'77-10-13. T.H / Ó.D.

T. 446 T. 246

Krafla Jarðefn.fr.

F. 16170

MYND 2.7



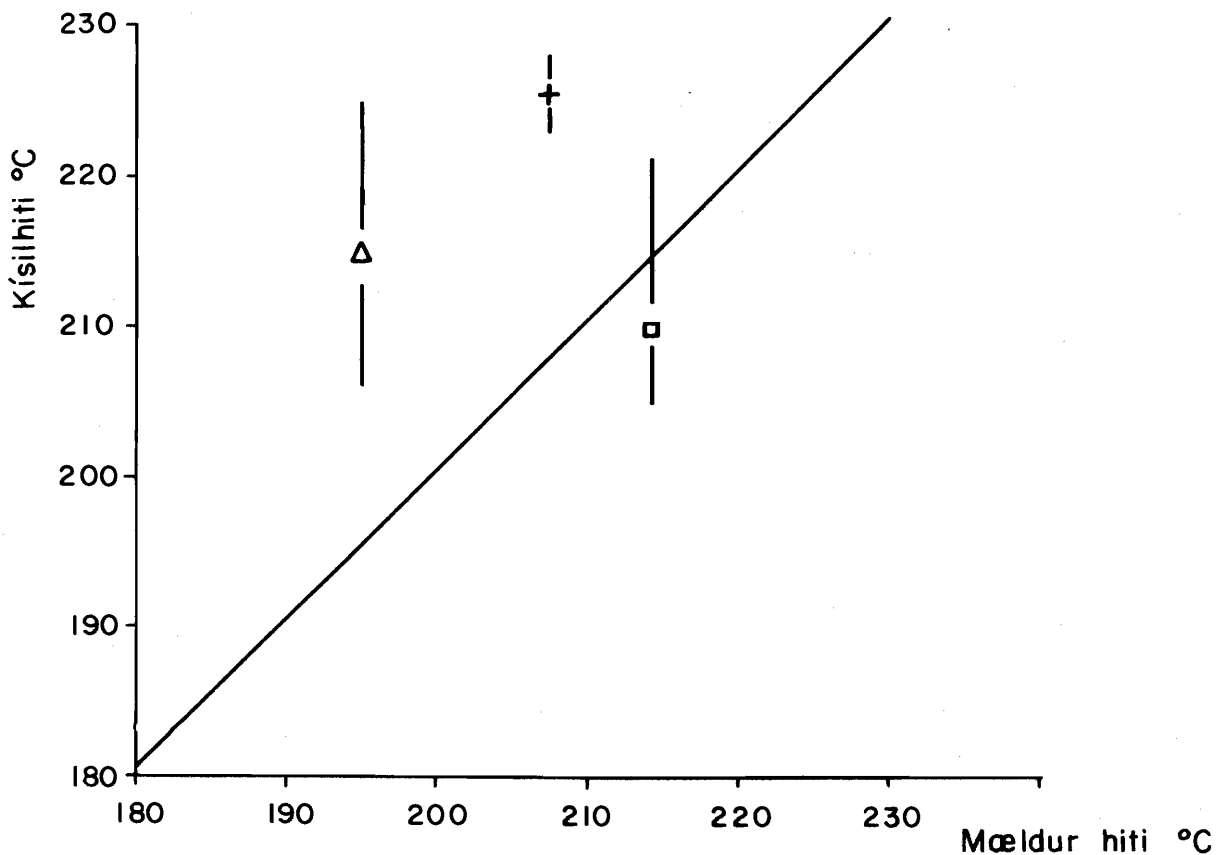
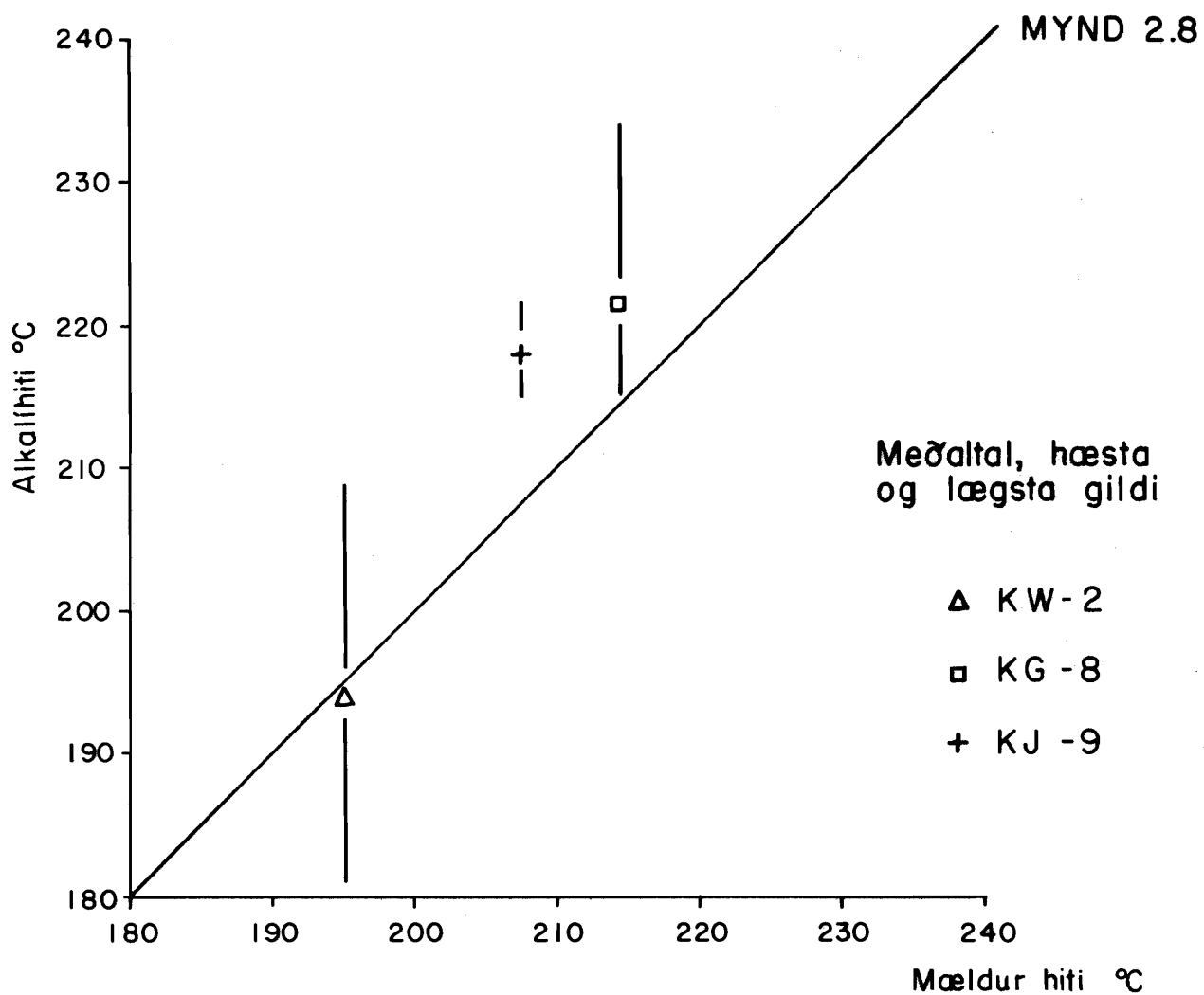
2.4 Kísilhiti og alkali-hiti

Styrkur kísils (SiO_2) í djúpvatni á háhitasvæðum stjórnast af leysni kvarts, en hún er aftur háð hitastigi (4,5). Með því að mæla styrk kísils er því unnt að reikna hitastig djúpvatns. Þetta hitastig er nefnt kísilhiti. Annar "efnahitamælir" er svokallaður alkali-hitamælir. Hann byggist á jónaskiptajafnvægi milli natríums (Na^+), kalíums (K^+) og kalsíums (Ca^{++}) annars vegar og ummyndunarsteinda í berginu hins vegar. Þetta jónaskiptajafnvægi er háð hita. Efnagreining á fyrrgreindum efnum gerir því mönnum kleift að reikna alkali-hita. Töluverð og góð reynsla er af notkun kísilhita, en ágæti alkali-hita hér á landi er ekki eins vel reynt.

Beinar hitamælingar í blæstri hafa verið gerðar á þremur efri hluta holum í Kröflu. Á mynd 2.8 er borinn saman kísilhiti og mældur hiti, og alkali-hiti og mældur hiti. Þar sést, að bæði kísilhiti og alkali-hiti eru hærri en mældur hiti í holu KJ-9. Í holu KW-2 er kísilhiti einnig hærri, en alkali-hiti lægri. Í holu KG-8 er alkali-hiti hærri, en kísilhiti lægri en mældur hiti.

Ekki er ljóst, hvers vegna reiknuðu hitastigin víkja frá raunverulegum hita. Ein skýring er sú, að nokkurn tíma tekur að ná nýju jafnvægi, ef breytingar verða á hitastigi. Þannig gæti of hár kísilhiti í KW-2 og KJ-9 stafað af því, að vatnið beri merki hærri hita, þ.e. að vatnið hafi kólnað við suðu ekki löngu áður en það rann inn í holurnar. Þetta er í samræmi við hringstreymislíkan það sem sett var fram í kafla 2.3.

Alkali-hiti í KW-2 er sá sami og mældur hiti sem getur bent til þess, að Na^+ , K^+ og Ca^{++} séu fljótari að ná jónaskiftajafnvægi við bergið en kísillinn að komast í nýtt jafnvægi við kvarts, ef hitastig breytist.

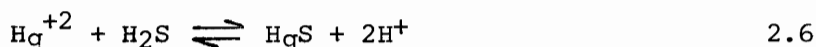
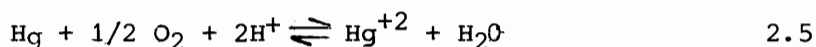


2.5 Kvikasilfur

Sýnt hefur verið fram á, að í grennd við jarðhita og eldvirkni, er styrkur kvikasilfurs hærrí en gengur og gerist (6,7). Athuganir á kvikasilfri í jarðhitarannsóknnum hafa einkum gegnt tvenns konar hlutverki, þ.e. könnun á styrk þess í jarðhitavökva borhola orkuvera til könnunar á því, hvort skaðlegs magns megi vænta í affallsvatni, og í yfirborðskönnunum í sambandi við jarðhitaleit.

Niðurstöður slíkra athugana og einnig mælinga á neðri hluta holum jarðhitakerfisins í Kröflu, benda til kvikuuppruna kvikasilfurs. Mælingar í Kröflu gerði Jón Ólafsson (8,9) og var markmið þeirra einkum að kanna, hvort líkur yrðu á skaðlegu magni þess í affallsvatni. Magnið er ekki það mikið, að ekki megi hafa hemil á því en frumniðurstöður þessar eru gagnlegar við efnáúttekt jarðhitasvæðisins.

Á leið sinni frá kviku getur kvikasilfur oxast, og kvikasilfursjónin bundist súlfíði. Við suðu jarðhitavökva má gera ráð fyrir, að kvikasilfur fylgi vökvafasa (sbr. mynd 2.1). Má ætla að kvikasilfursstyrkur hafi náð jafnvægi í holu KW-1, og haldist nokkuð jafn í afrennsli neðri hlutans, þ.e. efri hluta, nema í æðum, sem eru nógu ofarlega til þess að áhrifa súrefnis sé farið að gæta, þ.e.



Má þar því búast við styrkminnkun kvikasilfurs.

Kvikasilfursstyrkur í holum KW-1, KW-2 og KG-8 er skráður í töflu 2-1, og sést, að hann er áþekkur í holum KW-1 og KG-8, en öllu minni í KW-2, sem tekur vökva úr grynnri æðum. Einnig hefur þar orðið vart marktæks súrefnisstyrks í gassýnum, einkum þegar safnað hefur verið við lítinn þrýsting.

TAFLA 2-1 Styrkur kvikasilfurs í holum KW-1, KW-2 og KG-8

HOLA nr.	Dägs.	Hg ng/kg
KW-1	1977-08-30	139
KW-2	1977-08-29	40
KG-8	1977-08-28	132

2.6 Radon

Árið 1977 hófust reglulegar mælingar á radoni í holum á Kröflusvæðinu. Radon er geislavirkt eðalgas, og því mjög óvirkt kemískt. Mæld er geislun og er það í raun styrkur radon-222 samsætu, sem fundinn er. Mælingar þessar eru gerðar á vegum Egils Haukssonar og í upphafi var aðalmarkmið þeirra að kanna, hvort unnt væri að nota þær til jarðskjálftaspáa. Sennilega er Kröflusvæðið óhentugt í þessu augnamiði, en reynt hefur verið að draga annan lærdóm af niðurstöðum þessara mælinga.

Svo virðist sem radon komist á tvennan hátt í jarðhitavökvann. Annars vegar er hin náttúrulega geislavirka klofnun radíums-226 en vegna tiltölulega stöðugs óróa á svæðinu eru líkur á, að slíkt radon eigi greiða leið í jarðhitavökvann. Það radon, sem fram kemur í efri hluta kerfisins er sennilega að langmestu leyti þannig til komið. Niðurstöður mælinga í neðri hluta holum, sem ætla má, að séu í nánd við kviku, t.d. KG-10 og KJ-7 (sjá 3.7), benda til þess að radon-222 berist frá kviku. Það eyðist síðan vegna geislavirkrar klofnunar á leið sinni og eru áhrif þess líklega orðin óveruleg miðað við náttúrulega klofnun radíums-226, 20-25 dögum eftir gegnumstreymi um holu KG-10, og því væntanlega ekki marktæk í efri hluta jarðhitakerfisins.

Styrkur radons (sjá töflu 2.2) er tiltölulega lágur og jafn í efri hluta, þar sem um stöðugt ástand er að ræða. Nokkur brögð eru þó að styrksveiflum einkum á umbrotatímum og getur hvorttveggja valdið aukningu, aukin molnun bergs, sem gefur radoni greiðari leið til jarðhitavökva, og tímabundin nálægð kviku.

TAFLA 2-2 Styrkur radons í efri hluta

Hola nr.	Fjöldi sýna	Rn dpm/kg
KW-2	2	177
KG-8	13	214
KJ-9	2	228
Vegið meðaltal		211

3. NEÐRI HLUTI

3.1 Almennt um neðri hluta

Hér á eftir verða teknar til umræðu þær holur sem álitioð er að dragi vatn eða vatns-gufublöndu úr báðum hlutum jarðhitakerfisins. Þessar holur eru KW-1, KJ-6, KJ-7, KJ-9 (eftir dýpkun), KG-10, og KJ-11. Það sem einkennir þessar holur fyrst og fremst er hátt varmainsihald, hár kísilhiti og mikið gas í heildarrennslis. Holur KJ-6, KJ-7, KG-10 og KJ-11 eru djúpar holur er fá vatns-gufublöndu úr neðri hluta á allt að 2200 m dýpi. Holur KW-1 og KJ-9 eru aftur á móti grynnri og því talðar fá vatn eða vatns-gufublöndu ofarlega úr neðri hluta (1100-1250 m dýpi). Reynt er að varpa ljósi á eiginleika neðri hlutans út frá efnainsihaldi heildarrennslis úr fyrirtöldum holum.

Hola KG-3 er tekin fyrir í kafla 2 sem efrihluta hola. Eftir gos í Leirhnjúk 1975 varð gasaukning í holurennsli (3). Þetta bendir til að rennsli í holuna úr neðri hluta hafi annað hvort aukist eða breyst verulega í samsetningu. Á þessum tíma voru ekki gerðar beinar ákvarðanir á varmainsihaldi og því ekki unnt að greina innstreymi úr neðri æðum frá innstreymi úr þeim efri með reikningum. Þessari holu er því sleppt í umfjöllun um neðri hlutann hér á eftir. Ekki var unnt að mæla varmainsihald rennslis úr KG-4 á sínum tíma. Henni er því einnig sleppt í þessari umfjöllun. Holu KG-5 er og sleppt, það sem hún hefur aldrei blásið og er því efna- og varmainsihald rennslis hennar óþekkt.

3.2 Þrýstingur, hiti og dýpi æða.

Vatnsæðar í borholum í Kröflu hafa verið ákvarðaðar með ýmsum mælingum m.a. með ákvörðun á skoltöpum, hitamælingum og rennslismælingum. Í þessum mælingum hafa komið fram örfáar stórar æðar en margar smáæðar (10). Með hitamælingum og ákvörðun á varma og efna-innihaldi borholuvökva hefur fengist hugmynd um hvaða æðar gefi "kalt" vatn úr efri hluta jarðhitakerfisins og hvaða æðar séu heitari og gefi gasríka vatns-gufublöndu úr neðri hluta. Á mynd 3.1 er sýnd innbyrðis afstaða hola í þrívídd og eru helstu æðar merktar inn.

Á mynd 3.2 eru allar holur við Kröflu teiknaðar inn á flöt, er liggur hornrétt á Hveragil. Merktar eru inn á myndina allar helstu æðar, er draga vatns-gufublöndu úr neðri hluta. Á myndinni er sýnd lína, sem dregin er frihendis gegnum æðapyrpinguna og sker yfirborð við Hveragil. Þessi lína á að sýna hugsanlegan skurðflöt æða, (sjá einnig mynd 3.1) sem gæti þá verið sprunga er bæri vatn eða vatns-gufublöndu til yfirborðs. Hallinn skv. myndinni er um 12°. Tölur innan sviga við æðar sýna frávik æða frá fletinum í gráðum þ.e. þann meðalhalli, er hola þyrfti að hafa fyrir ofan æð til að æðin lendi á fletinum. Meðalfrávik er um 3.2° en mesta frávik um 8.8°. Þess skal getið að halli í holu í Kröflu hefur mælst allt að 10° frá lóðlínu.

Ef dregnar eru saman niðurstöður mælinga á hita og þrýstingi í gasi og varmastreymi úr holum má ákvarða líklegt hita- og þrýstiástand við hverja æð hverrar holu (11). Þetta er sýnt á myndum 3.3 og 3.4. Þar sést að þrýstingur á 1000-2000 m dýpi er nálægt suðumarksferli en að jafnaði um 6 börum hærri. Hiti liggur hins vegar mjög nærri suðumarksferli. Líklegt er, að hlutþrýstingur koldíoxíðs ráði mestu um þennan mun á hita og þrýstiferli (sjá kafla 3.4). Í eftirfarandi töflum eru þessar niðurstöður dregnar saman og sýnd hámarks- og lágmarksgildi ásamt líklegasta meðalhita innstreymis úr neðri hluta.

TAFLA 3.1 Prýstingur, bar

	KW-1	KJ-6	KJ-7	KJ-9	KG-10	KJ-11
Hámarksprýst.	87	121	152	93	154	182
Lágmarksprýst.	89	-	-	-	152	148

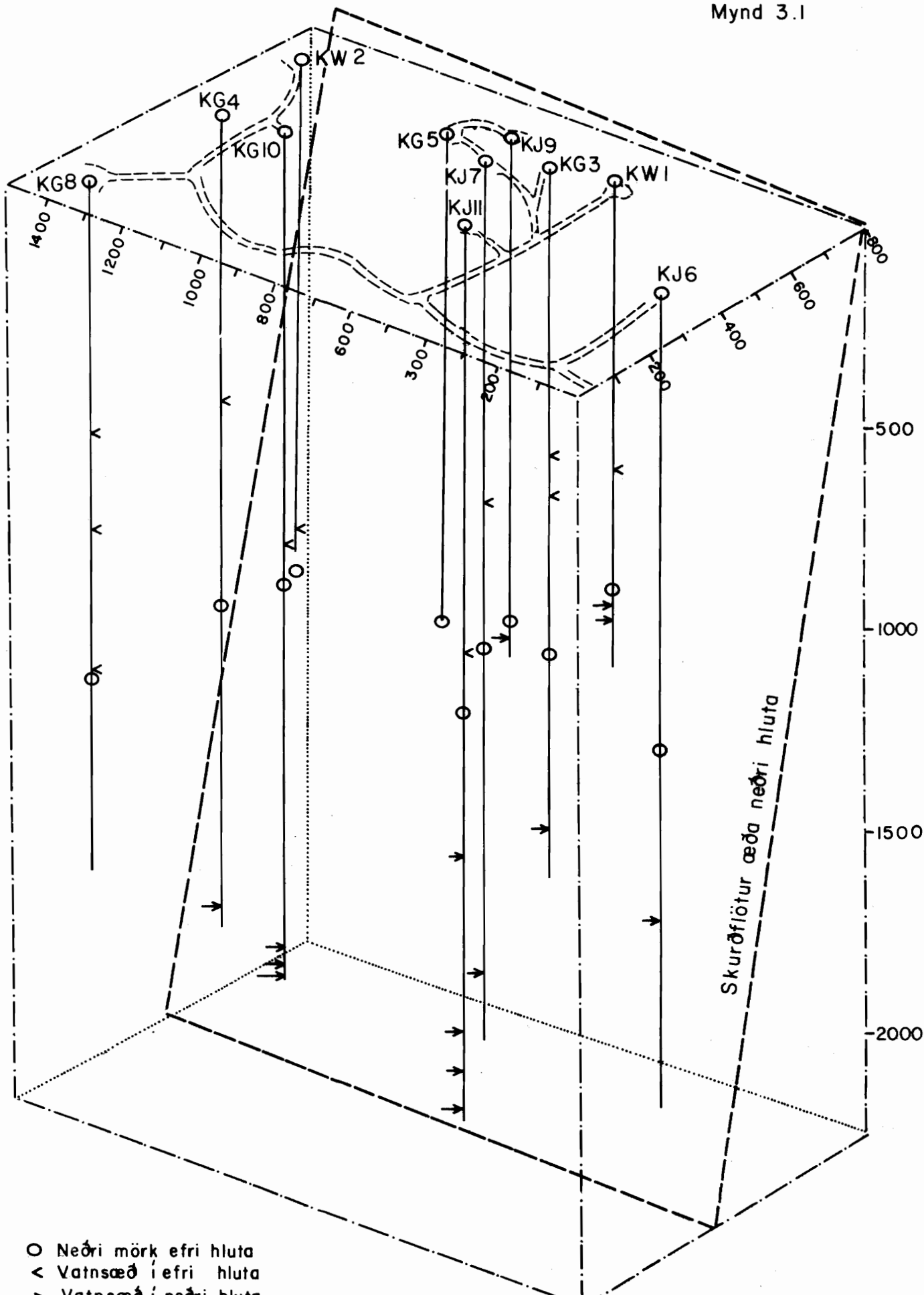
TAFLA 3.2 Hitastig, °C

	KW-1	KJ-6	KJ-7	KJ-9	KG-10	KJ-11
Lágmarkshiti	290	210	340	280	310	300
Hámarkshiti	304	340	-	306	-	352
Líklegur meðalh.	~298	~322	~340	~306	~340	~340

Á mynd 3.5 er líklegt meðalhitastig hverrar holu teiknað inn á flöt þann er lýst var hér að framan. Skurðpunktur holu og flatar var fenginn með því að varpa helstu æð hverrar holu lárétt á flötinn. Einnig eru jafnhitalínur suðumarksferils teiknaðar inn á flötinn.



Mynd 3.1



- Neðri mörk efri hluta
- < Vatnsæð í efri hluta
- ↓ Vatnsæð í neðri hluta



ORKUSTOFNUN

Hugsanlegur skurðflötur helstu æða neðri hluta og sprungu eftir Hveragili

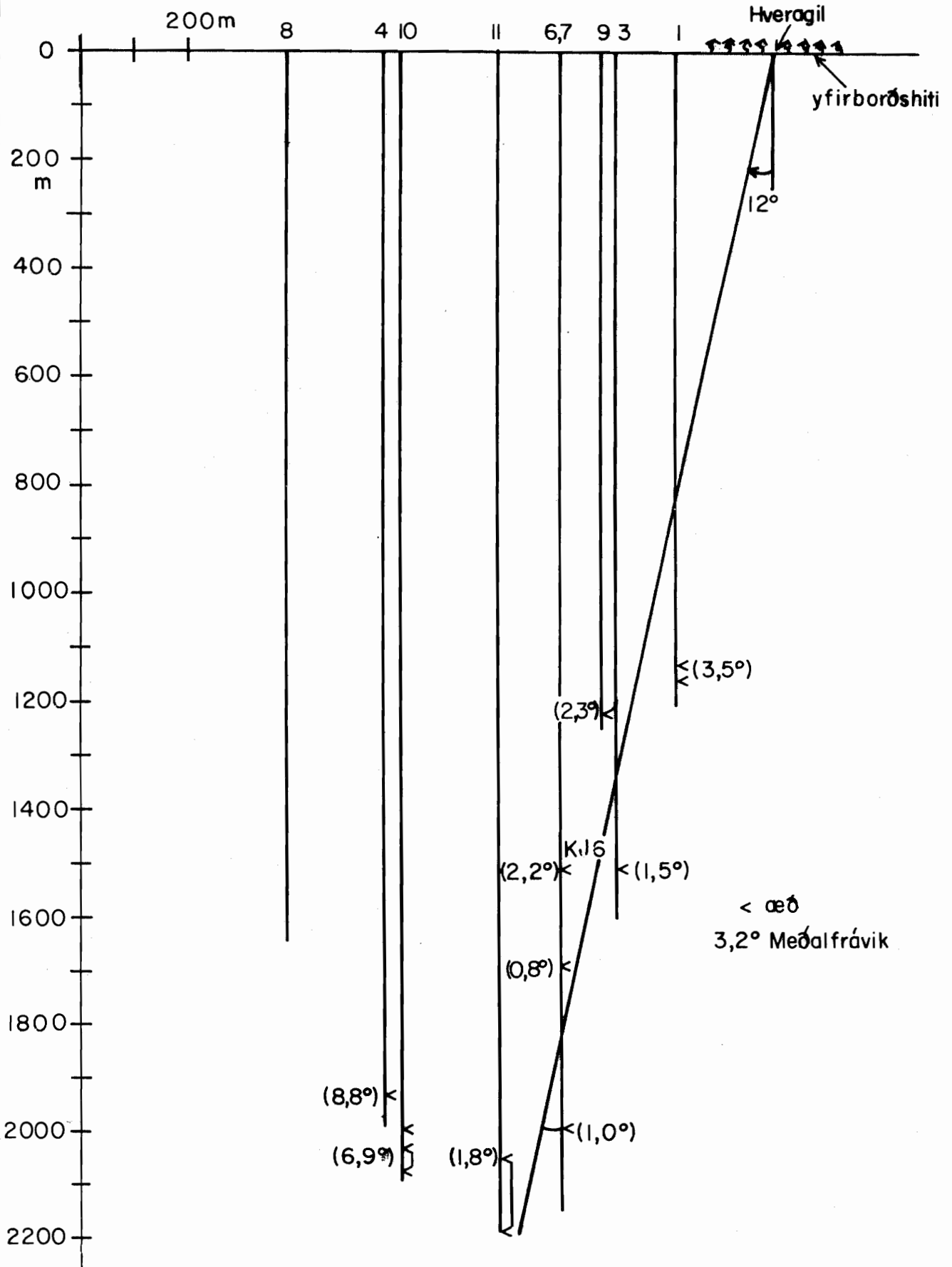
'78.07.27 T.H/ A.A

T 703

Krafli

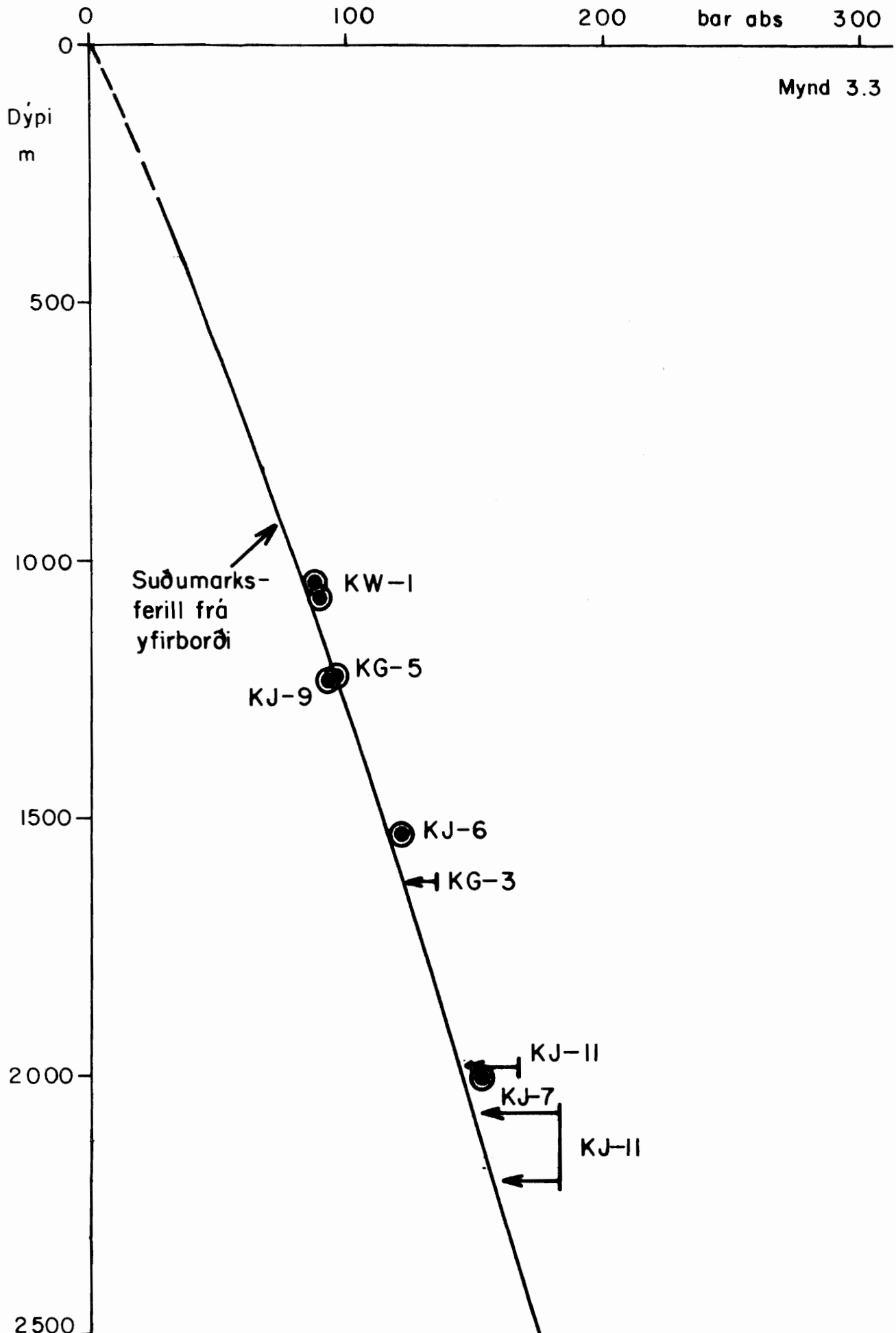
F 17419

Mynd 3.2





Líklegt þrýstingsástand í neðri hluta Kröflusvæðis





Líklegur hiti í neðri hluta
Kröflusvæðis

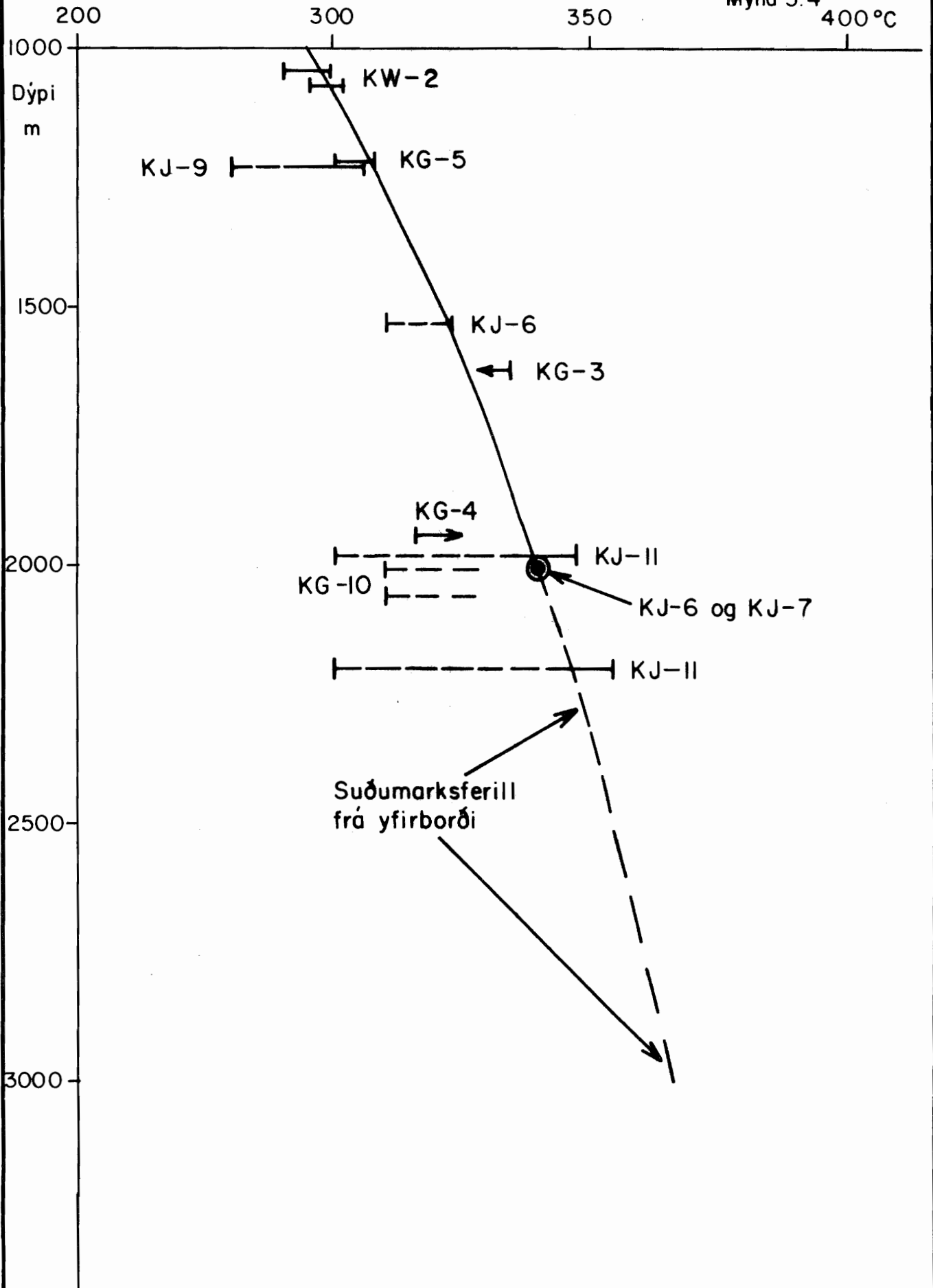
'78.II.01

Krafla

F17775

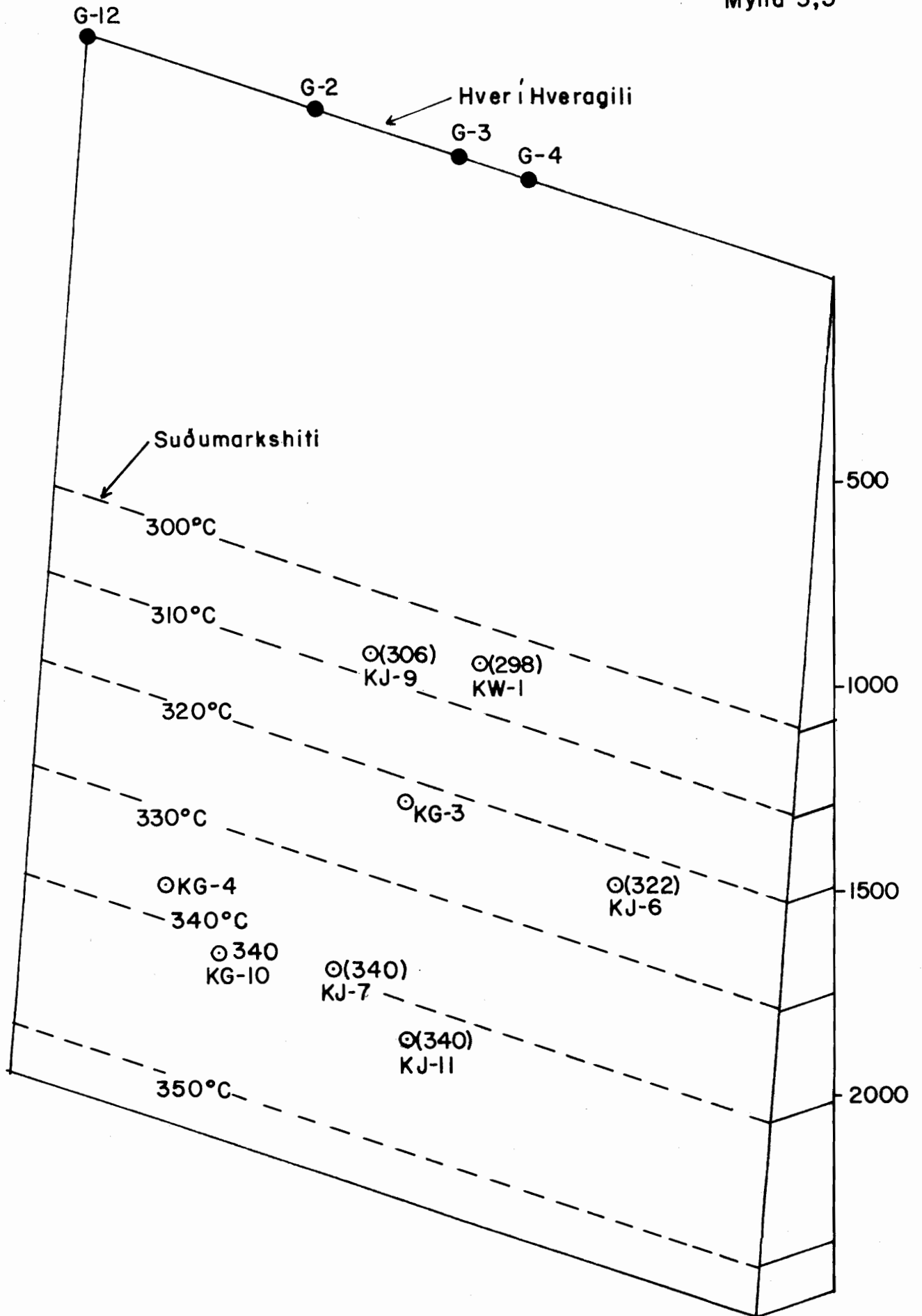
Mynd 3.4

400 °C





Mynd 3,5



3.3 Varmainnihald og hlutur neðri æða í heildarrennsli

Um árabíl hefur uppleystur kísill í vatni gufuborholu verið notaður til að ákvarða meðal innstreymishita (4). Þetta er gott og gilt ef innstreymi er hreinn vatnsfasi og vökvinn streymir "innrænt" upp holuna. Í Kröflu er innstreymi úr efri hluta jarðhitakerfisins hreinn vatnsfasi en úr þeim neðri streymir vatns-gufublanda. Nú er innstreymishiti efri hluta nokkuð vel þekktur (kafla 2.4) og er varlegt að áætla hann fastan um 210°C. Sé þetta gert er hægt að reikna varmainnihald innstreymis úr neðri hluta sem fall af hitastigi. Ef gert er ráð fyrir "innrænni" suðu frá jafnvægisástandi við kvarts, þá er hitastigið jafnvæghiti við meðalstyrk kísils í innstreymisvatni úr neðri hluta. Að auki er hægt að reikna hlut innstreymis úr neðri æðum í heildarrennsli hverrar holu. Reikningsaðferðum þessum eru gerð skil í viðauka 1. Áhrif frávíka frá gefnum forsendum eru rædd í viðauka 2.

Ekki er hægt að segja með vissu um, hver kísilhiti innstreymis úr neðri hluta er en þó má frá hita- og þrýstímælingum áætla líklegan hámarks- og lágmarkshita fyrir hverja holu. Í kafla 3.2 er sýnt hvernig þetta hitabil er áætlað.

Reikningar voru gerðir fyrir öll sýni og varmainnihaldsákvæðanir frá því að hver hola byrjaði að blása fram í ársbyrjun 1978. Til að sjá breytingu með tíma var notast við líklegan hita úr töflu 2.2 og varmainnihald og hlutur neðri æða teiknað á myndir 3.6-3.11. Inn á myndirnar er skrifað meðalgildi varmainnihalds og rennslis úr neðri hluta.

Í töflu 3.3 eru birtar töflur um meðalgildi varmainnihalds og hluts neðri æða hola í Kröflu. Einnig eru birtar tölur um rennsli úr neðri æðum við 8-10 bara toppþrýsting fljótlega eftir að holurnar byrja að blása.

TAFLA 3.3 Varmainnihald og hlutur neðri æða (meðalgildi)

		KW-1	KJ-6	KJ-7	KJ-9	KG-10	KJ-11
Varmainnihald kJ/kg	fyrir	2140	1940	2400	-	(1940)*	2175
Massahl. neðri æða%	hreins.	63	68	78	-	(38)	34
Varmainnihald kJ/kg	eftir	-	-	2140	1480	(2000)*	2125
Massahl. neðri æða%	hreins.						
	(dýpk.)	-	-	76	63	(40)	27
Rennsli úr neðri æðum	kg/s	3.2	9.6	7.4	52	22	14

*Hámarksgildi

Hola KW-1 var áður álitin taka vatn úr efri hluta, enda grunn.

Í ágúst 1977 var gerð aflmæling á holunni er gaf að varmainnihald rennslis væri um 1680 kJ/kg (10). Þessi tala er notuð við reikninga fyrir öll sýni úr holunni. Niðurstöðurnar sýna, að vatns-gufublanda úr neðri æðum streymir inn í holuna en vatn ofar, ef forsendur reikninga eru réttar. Niðurstöðum fyrir tvö elstu sýnin ber að taka með fyrirvara, þar eð engin mæling á varmainnihaldi er til frá þeim tíma (mynd 3.6).

Mun fleiri mælingar eru til á varmainnihaldi streymis úr holu KJ-6 (10). Þó ber einnig að taka niðurstöðum fyrstu sýna með varúð því að varmainnihald var fyrst mælt í nóvember 1976. Á mynd 3.7 virðist sem varmainnihald neðri æða KJ-6 fari lakkandi með tíma. Þetta gæti stafað af því að æðar með hæstu varmainnihaldi hafi dalað meira en aðrar æðar, t.d. vegna útfellinga. Heildarrennsli úr holunni minnkaði verulega á sama tíma. Hlutfall rennslis úr neðri og efri æðum virðist þó samkvæmt þessum reikningum vera stöðugt.

Um holu KJ-7 eins og KJ-6 gildir, að mælingar á varmainnihaldi eru ekki framkvæmdar frá upphafi. En eftir að mælingar hefjast, kemur í ljós, að varmainnihald heildarrennslis eykst samhliða því að rennsli úr holunni minnkar (10). Reikningar gefa aftur á móti, að varmainnihald neðri æða er tiltölulega stöðugt meðan hlutur neðri æða í heildarrennsli eykst (mynd 3.8). Það virðist því sem rennsli úr efri æðum hafi minnkað örvar en rennsli úr neðri æðum. Þegar holan var hreinsuð kom í ljós mikið magn útfellinga í holunni. Gerðar voru tíðar aflmælingar, þegar holunni var hleypt á nýjan leik í gos. Samkvæmt reikningum

virðist sem varmainnihald og rennsli úr neðri æðum hafi farið ört stígandi eftir upphleypingu. Fyrst í nóvember varð vart við skyndilega aflrýrnun holunnar. Hlutur neðri æða minnkaði og varmainnihald hættir að stíga og helst á gildi sem er mun lægra en var fyrir hreinsun.

Hola KJ-9 var dýpkuð haustið 1977 og efri æðar fóðraðar af að mestu leyti. Henni var hleypt upp í lok september og gerðar tíðar aflmælingar fram í desember (10). Á mynd 3.9 sést, að hlutur neðri æða hefur í upphafi verið allt að 100% af heildarrennsli og innstreymi eingöngu vatnsfasi. Síðan minnkaði hlutur neðri æða samfara hækkun varmainnihalds að meðalgildi um 1480 kJ/kg. Þetta bendir til, að innstreymi verði vatns-gufublanda er frá líður upphleypingu samhliða því að hlutur neðri æða lækkar vegna tregs rennslis vatns-gufublöndu í bergi.

Holu KG-10 var hleypt upp í desember 1976 og kom hún upp með óhemju afli. Fljótlega fór þó af henni mesti móðurinn og dalaði hún ört um og yfir áramótin (10). Vegna þessa eru eingöngu fyrstu sýnin talin gefa áreiðanlega mynd af ástandi neðri æða. 17. janúar jókst afl skyndilega (kvikuhlaup 20. jan.) en minnkaði hratt aftur og eftir miðjan febrúar má segja, að holan taki inn vatn eingöngu úr efri hluta (mynd 3.10). Holan var síðan hreinsuð og voru heilmiklar útfellingar í henni. Allt fór á sömu leið, holan kom upp með miklum látum en hlutur neðri æða varð óverulegur eftir fáeina mánuði.

Holu KJ-11 var hleypt upp í febrúar 1977 og tók það neðri æðar þó nokkurn tíma að ná sér upp (mynd 3.11). Varmainnihald neðri æða var breytilegt og kann það að stafa af óstöðugum blæstri holunnar (10). Vegna þess hve lítið vatn kemur úr neðri æðum miðað við heildarrennsli holunnar hefur uppleystur kísill í því lítill áhrif á það heildarmagn kísils, er mælist við holutopp. Þetta kann einnig að skýra þær breytilegu niðurstöður á varmainnihaldi, er fást úr reikningunum. Engar útfellingar komu í ljós, er holan var hreinsuð í október 1977 og virðist sú aðgerð lítil áhrif hafa haft. Hlutur neðri æða KJ-11 er lítill miðað við aðrar blandholur á svæðinu.

Talað hefur verið um að loka efri æðar í KJ-11 af og vinna eingöngu neðri æðar. Samkvæmt þessum reikningum yrði þá rennsli hennar 10-12 kg/s, varmainnihald 2100-2200 kJ/kg og gasinnihald um 3.5%.

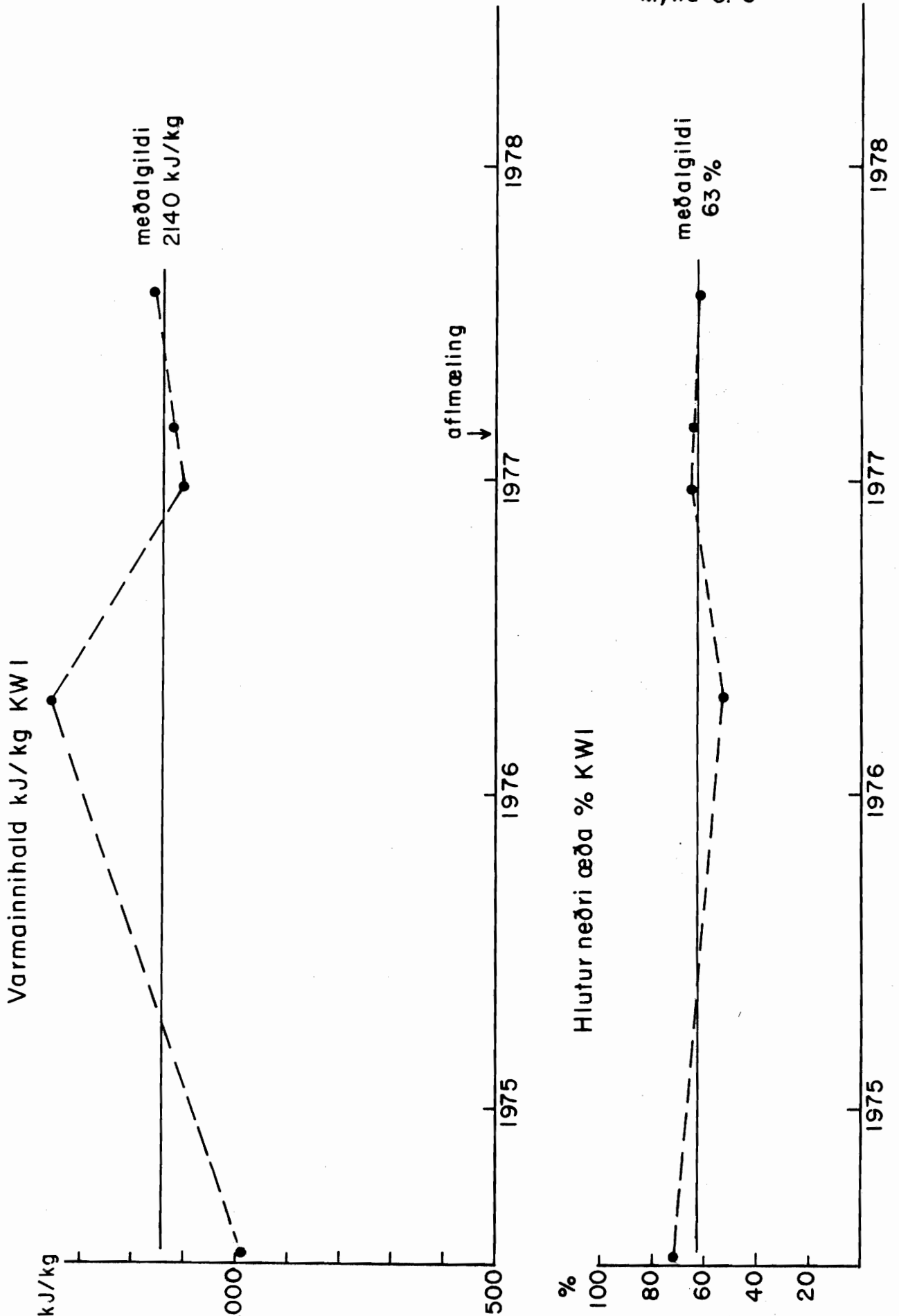
Á mynd 3.12 er sýnt, hversu mikil áhrif valið hitastig hefur á reiknuð gildi varmainnihalds og hluts neðri æða í heildarrennsli. Sýni er gefa varma og gasinnihald sem er nálægt meðalgildum fyrir hverja holu eru teiknuð inn á myndina. Við sjáum, að valið hitastig hefur engin veruleg áhrif á niðurröðun hola eftir varmainnihaldi. Efsti ferillinn sýnir varmainnihald mettaðrar gufu og neðsti mettaðs vatns. Þar á milli er vatns-gufublanda með varmainnihald, er ákvarðast af gufuhlutfalli blöndunnar. Ferlarnir lenda allir innan þessa svæðis fyrir hitastig milli 280-360°C. Því er ljóst, að innstreymi úr neðri hluta er vatns-gufublanda í öllum holum, að KJ-9 undantekinni. Í KJ-9 virðist streyma vatnsfasi í upphafi blásturs en vatns-gufublanda, er frá líður (sjá mynd 3.9).

Myndir 3.13 og 3.14 fást með því að setja varmainnihald og rennsli úr neðri æðum inn á flöt þann, sem sker Hveragilssprunguna og helstu æðar. Þar eru dregnir ferlar með jöfnu varmainnihaldi og rennsli. Af þessum myndum er helst að sjá, að hátt varmainnihald og tregt rennsli fari að einhverju leyti saman. Holur KW-1 og KJ-7 hafa hæst varmainnihald innrennslis í neðri æðar og þær hafa einnig tregasta rennslið. Í kafla 3.2 er rætt líklegt hitastig þess jarðhitavökva, sem streymir inn í holurnar. Þar kemur fram, að hiti er líklega mjög nálægt suðumarki (11). Því er sett fram sú tilgáta, að við upphleypingu holu byrji eða aukist suða í bergi umhverfis, og því þéttari sem æðar við holuna séu því meiri "isotermisk" uppgufun verði á leið vökvans að holunni. Sú tilgáta hefur einnig komið fram, að hið háa varmainnihald í KW-1 og KJ-7 gefi til kynna uppstreymi gufufasa í námunda holunnar til yfirborðs. Gufufasi er léttari en vatn og leitar því upp í gegn um sprungur og lekt berg meðan vatnsfasi leitar niður í þéttara bergi. Báðar þessar tilgátur hafa við rök að styðjast. Í fyrra tilfellinu er tregt rennsli í holum KW-1 og KJ-7 skýrt með lítilli lekt bergs en í því síðara með háu rúmáli gufu og því tregu rennsli í kg/s þrátt fyrir að bergið sjálft geti verið lekt í nágrenni við holurnar.



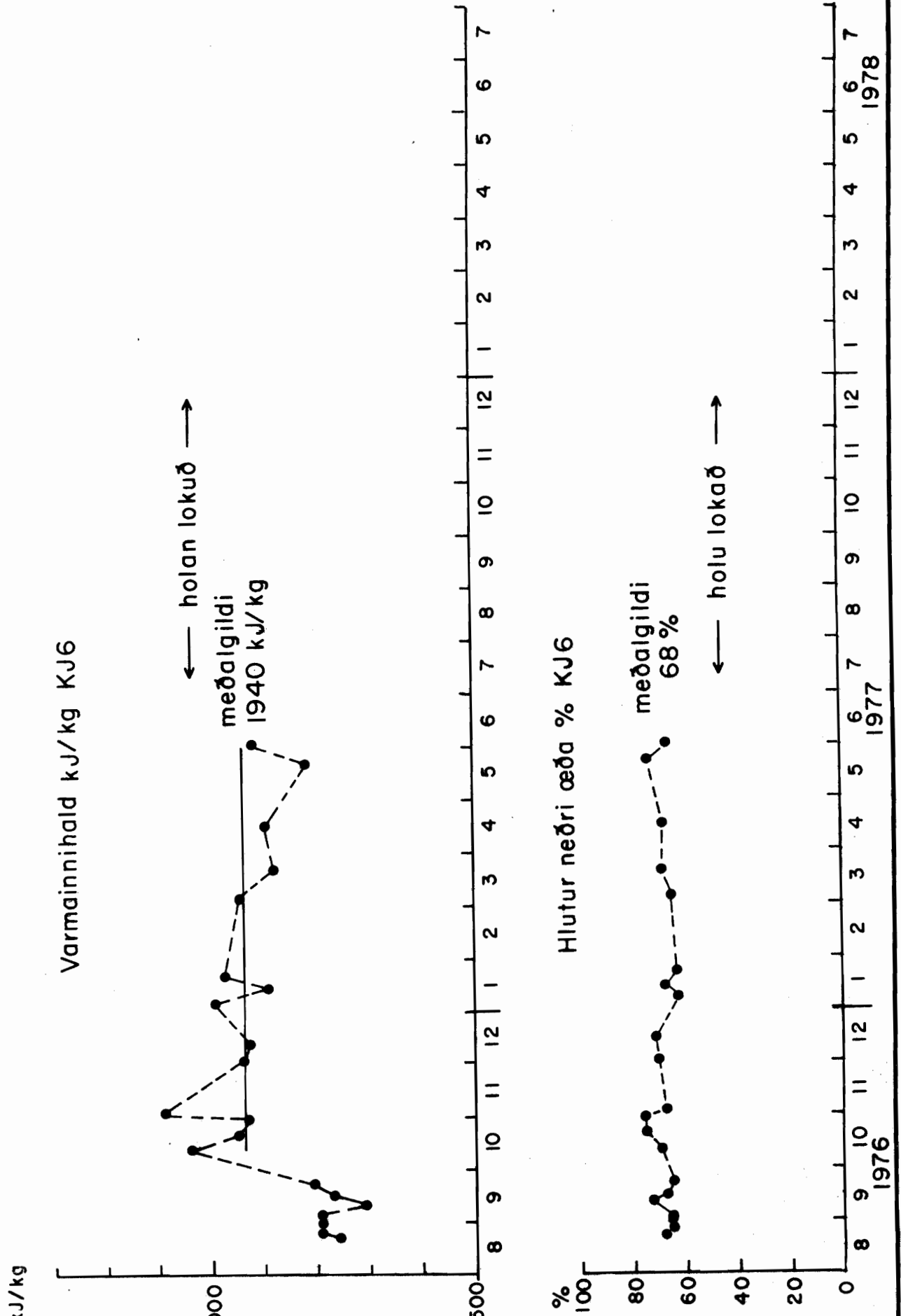
Varmainnihald og hlutur neðri æða KWI
hitastig ~300 °C

Mynd 3. 6





Mynd 3.7





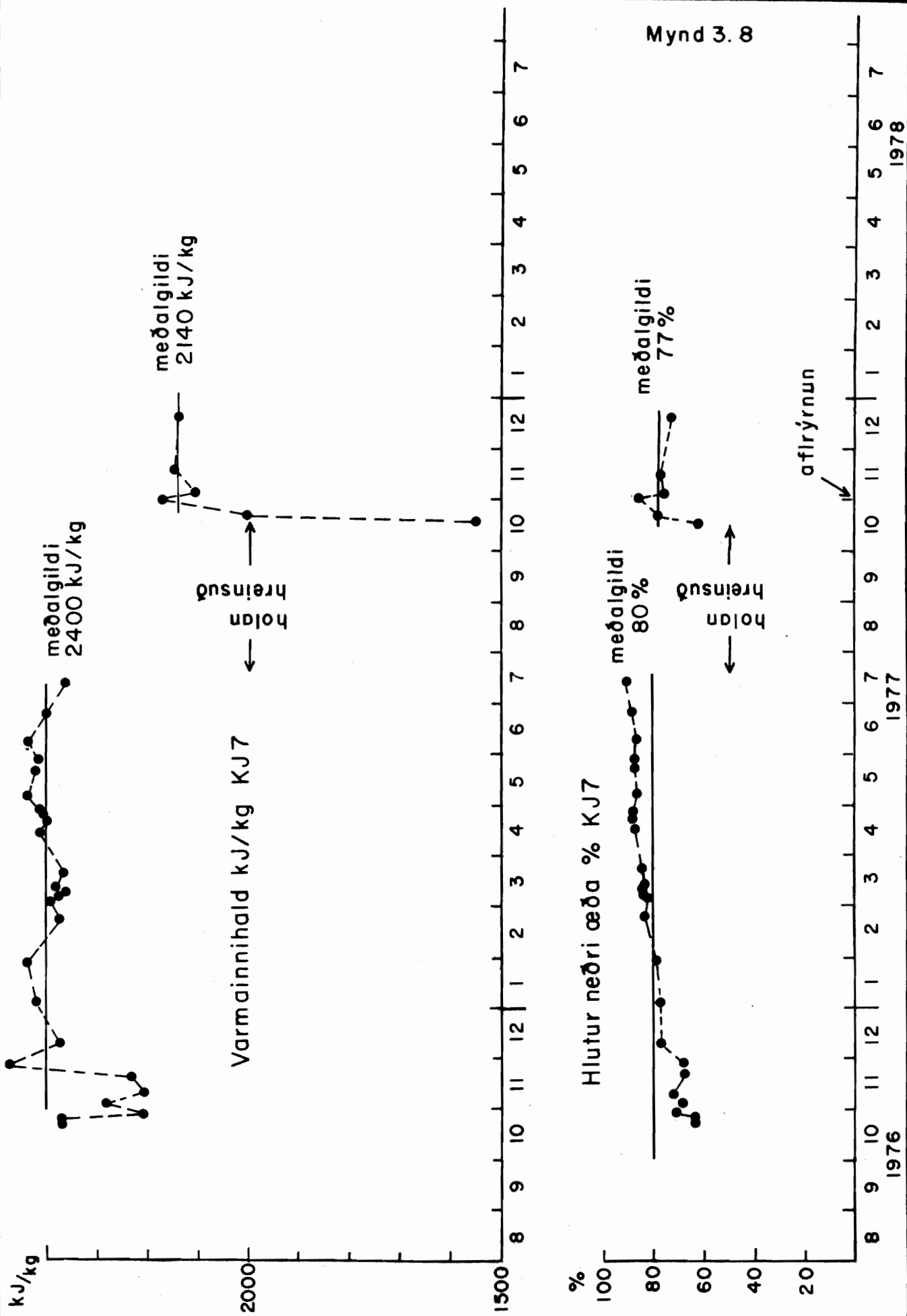
Varmainnihald og hlutur neðri æða KJ7
hitastig ~ 340 °C

TH/IS

78-08-31

Krafla Jarðefnaf.

F-17528





Varmainnihald og hlutur nedri æða KJ-9 (eftir dýpkun)
hitastig nedri æða ~300°C og efri æða ~250°C

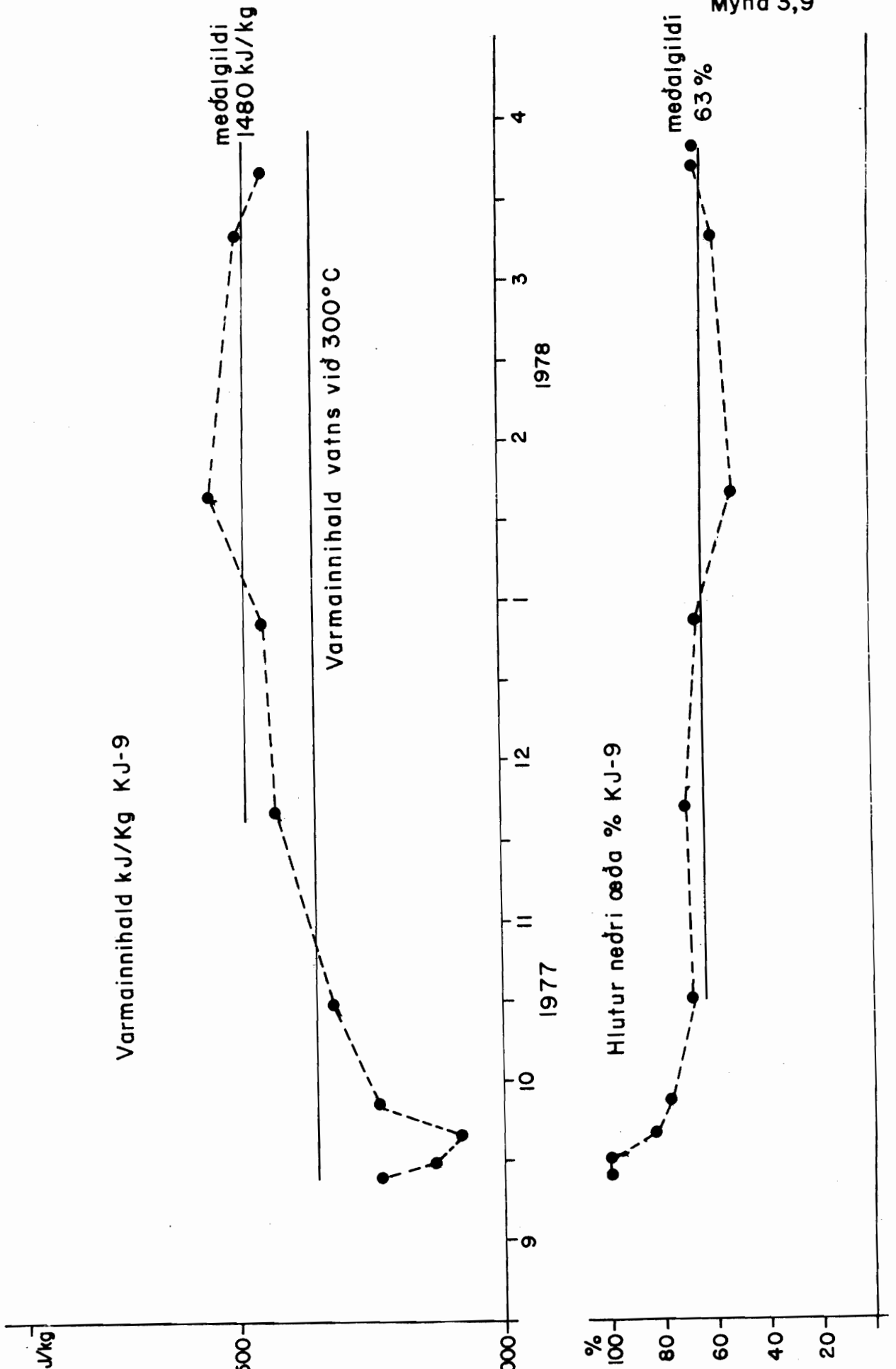
TH/Sy.J.

78-09-05

Jarðefnafr. Krafía

F17573

Mynd 3,9





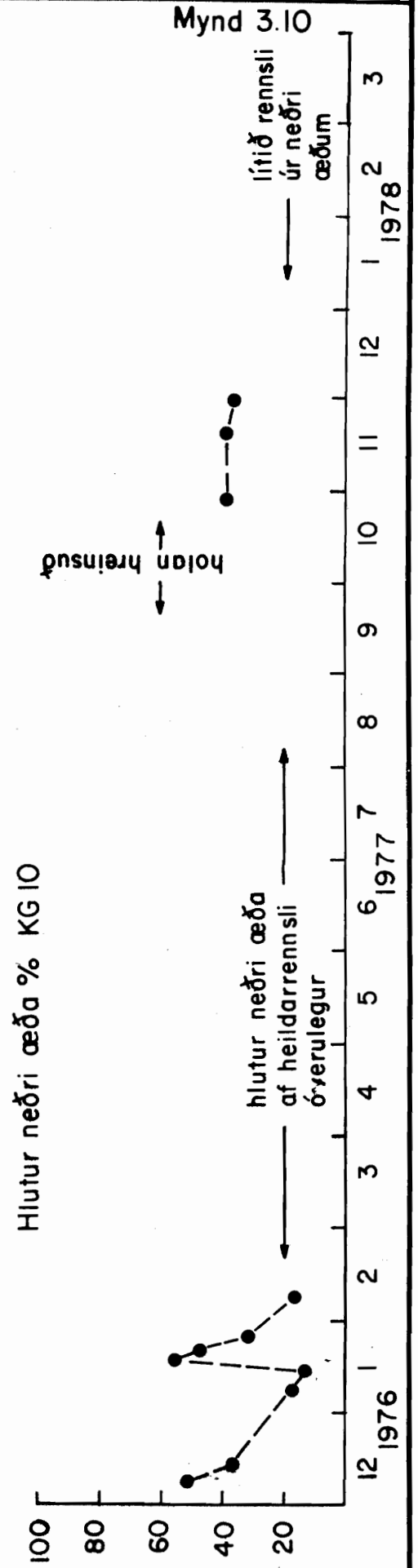
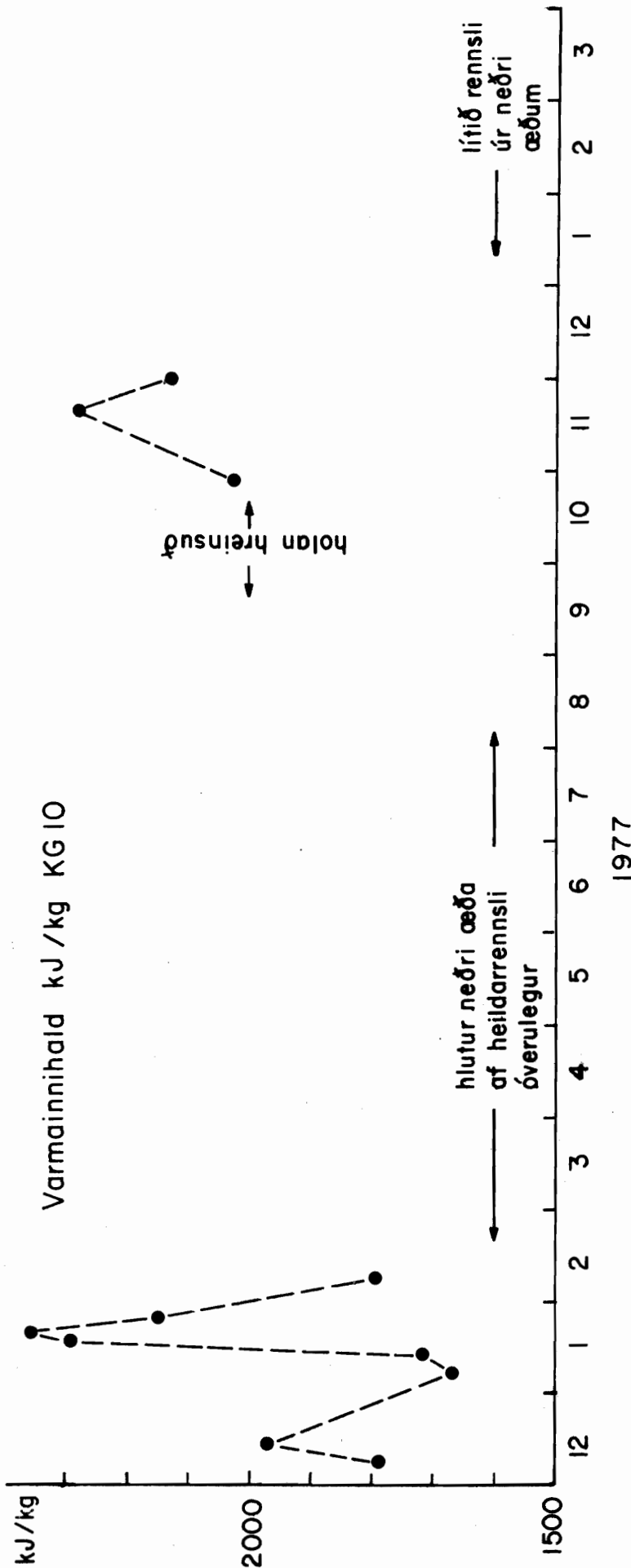
Varmainnihald og hlutur neðri æða KGIO, hitastig ~ 340°C

TH/H

78.08.31

Krafla Jarðefnaf.

F-17527





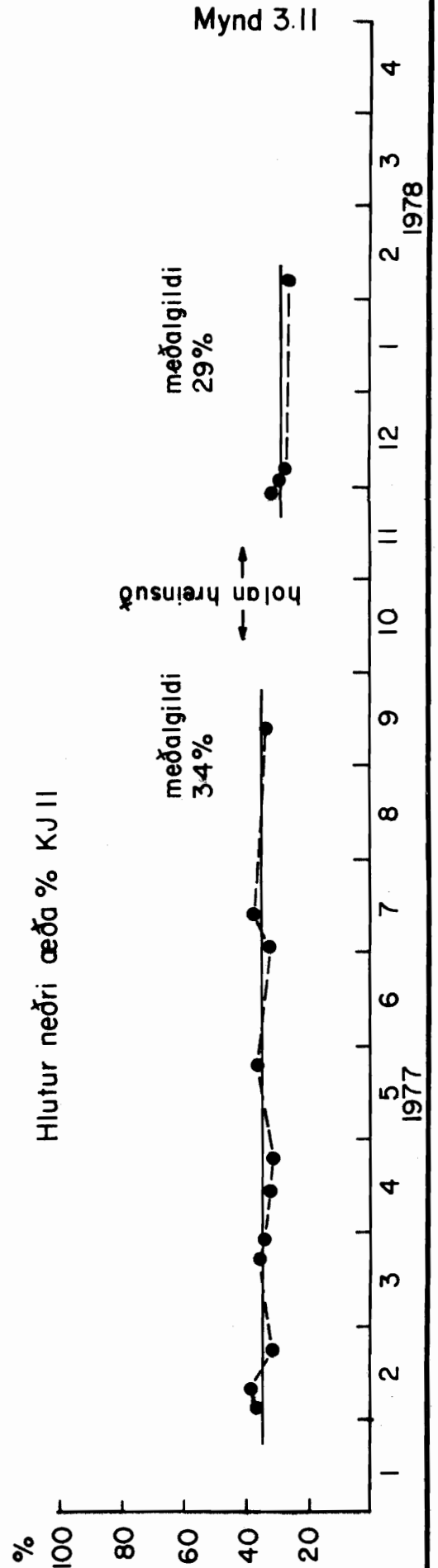
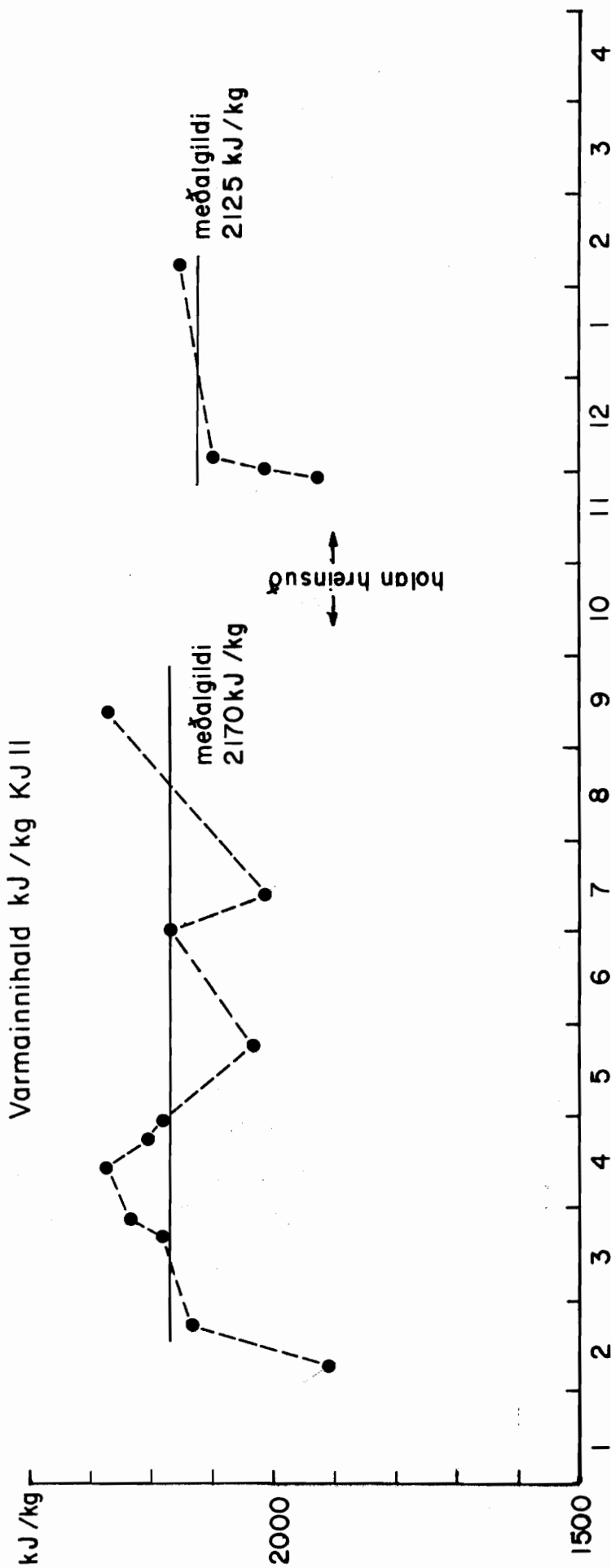
Varmainnihald og hlutur neðri æða KJ II,
hitastig ~ 340°C

TH/H

78.08.31

Krafla Jarðefnaf.

F-17526





Varmainnihald innstreymis úr neðri hluta
jardhitakerfisins í Kröflu

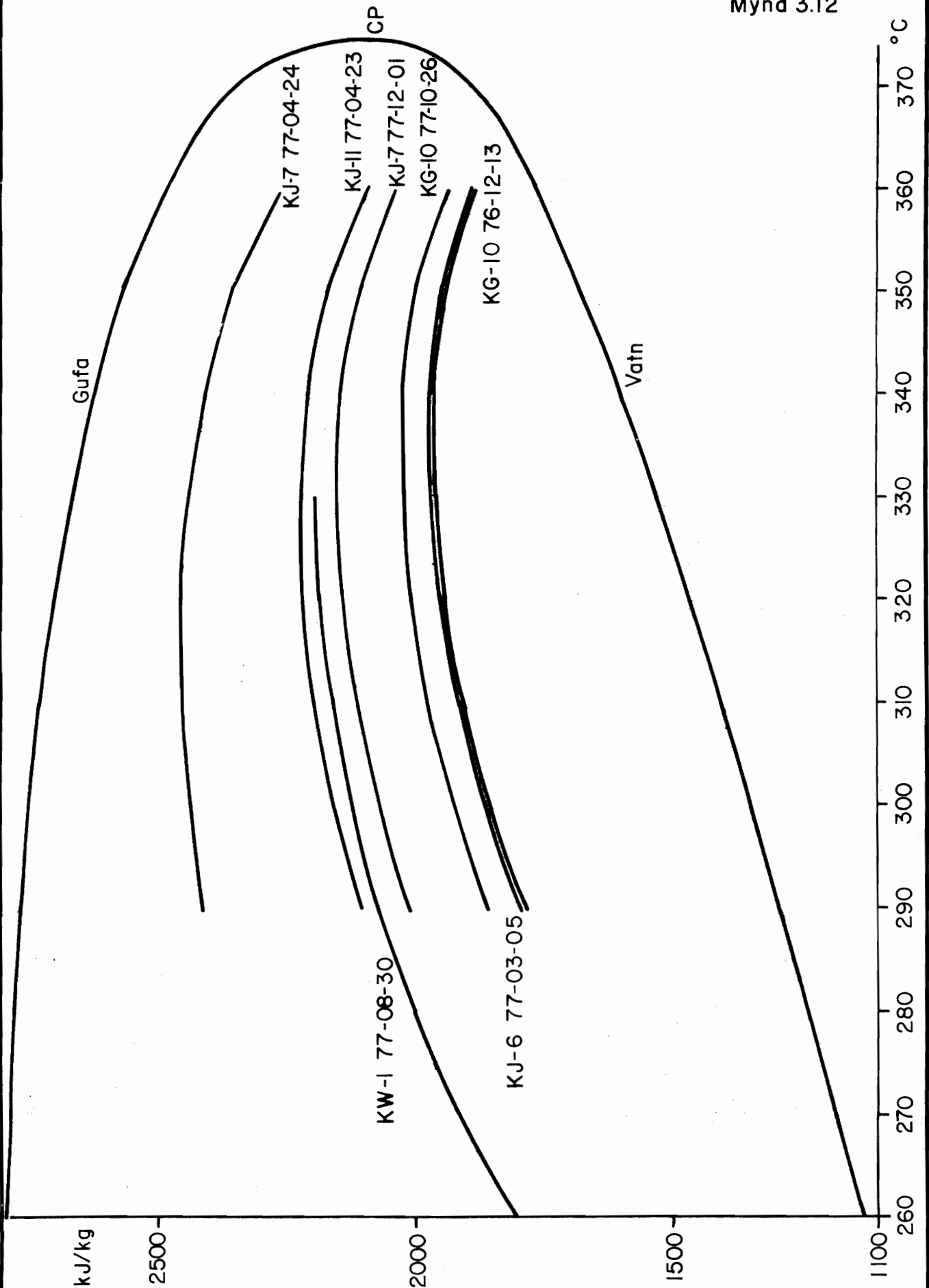
78-06-20 G.G./Sy.J.

T 624 T 280

Krafla Jarðefnafr

F 17169

Mynd 3.12





Mynd 3,13

G-12

G-2

Hver í Hveragili

G-3

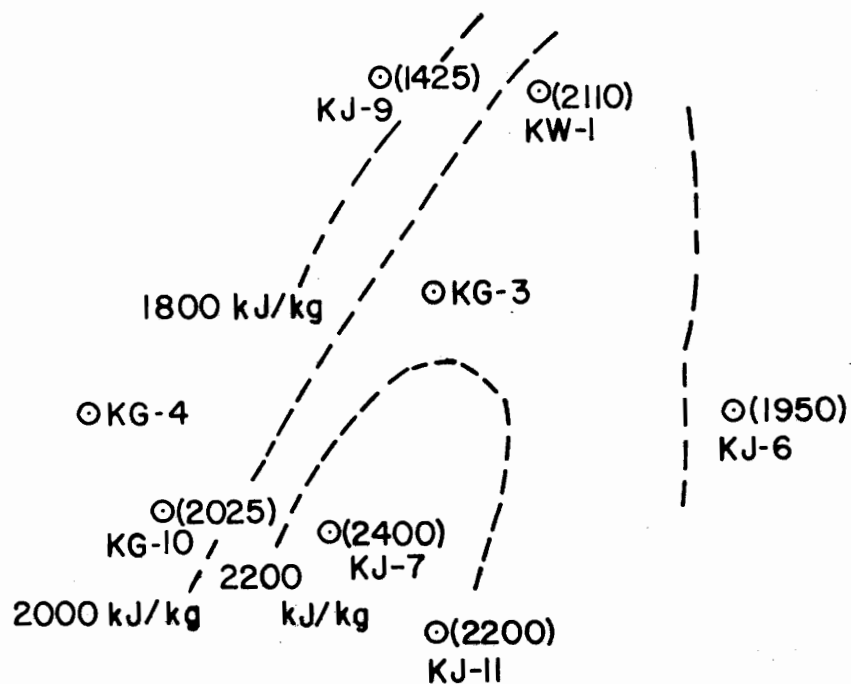
G-4

500

1000

1500

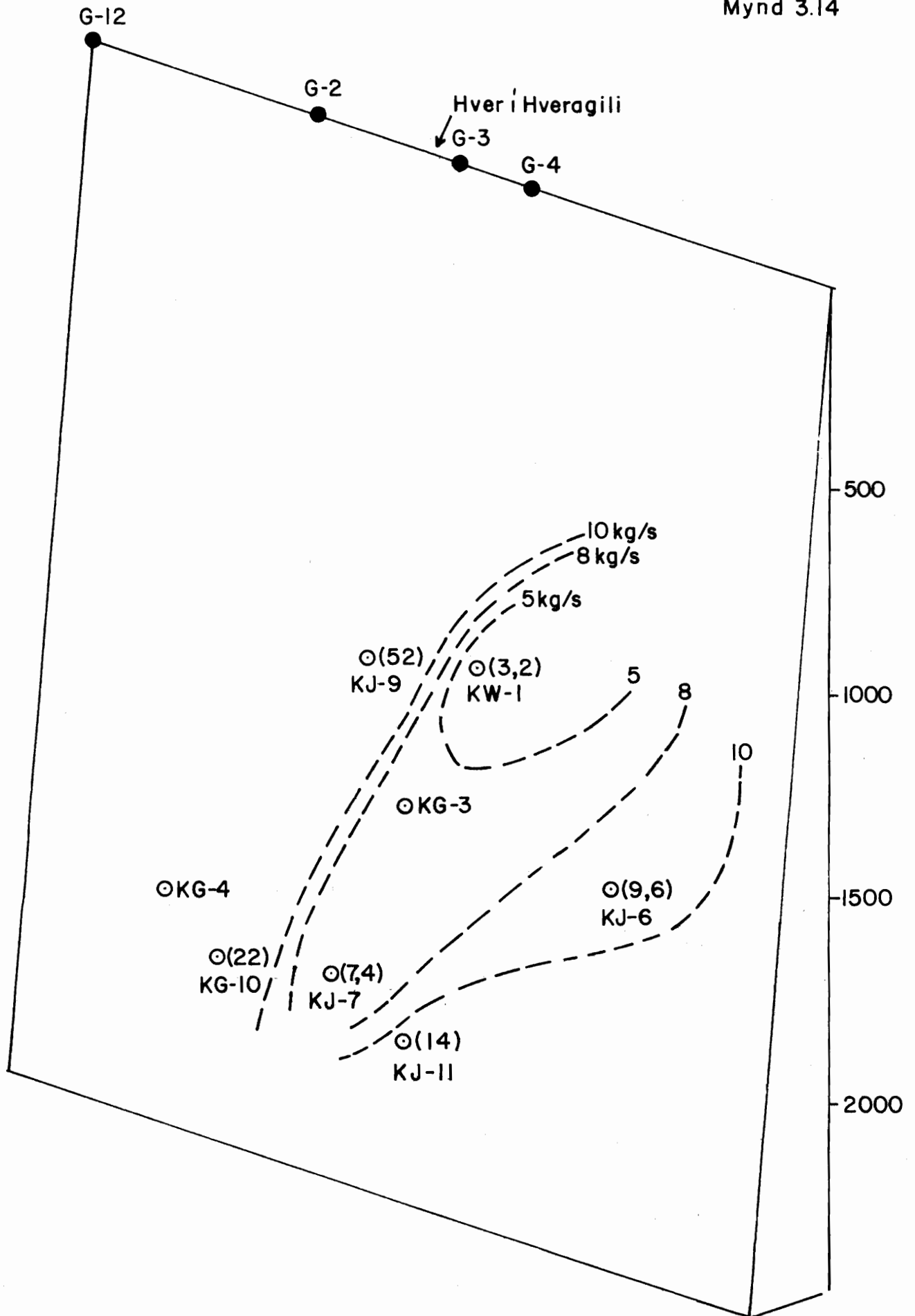
2000





Rennsli úr neðri æðum hola í Kröflu

Mynd 3.14



3.4 Styrkur koldíoxíðs og áhrif þess á þrýsting

Í rennsli úr djúpum borholum í Kröflu hefur mælst mikið koldíoxíð (CO₂) en aftur á móti er lítið koldíoxíð í grunnum borholum. Samkvæmt þessum mælingum er koldíoxíð í djúpvatni úr efri hluta geymisins um 0.01-0.06 %. Hið mikla gasmagn sem mælist í heildarrennsli djúpra hola (~ 3-4.0 %) hlýtur því að vera ættað úr neðri hluta geymisins. Í viðauka 1 er lýst hvernig koldíoxíðstyrkur innstreymis úr neðri æðum er reiknað ásamt því hvernig dreifing koldíoxíðs milli vatns og gufu er ákvörðuð við gefið hitastig. Ef við veljum okkur ákveðið hitastig er hægt að teikna koldíoxíðstyrk innstreymis úr neðri æðum sem fall af tíma. Þetta er birt á myndum 3.15 og 3.16, þar sem sést að koldíoxíðinnihald er mjög breytilegt eftir holum og eru meðalgildi sýnd í eftirfarandi töflu:

TAFLA 3.4

	KW-1	KJ-6	KJ-7	KJ-9	KG-10	KJ-11
% CO ₂ fyrir hreinsun	0.63	1.3	4.3	-	7.8*	3.5
% CO ₂ eftir hreinsun	-	-	5.5/3.5	1.2	10.6*	-

* Hámarks gildi

Sýni, er hafa varmainnihald og koldíoxíð í neðri æðum nálægt meðalgildi, eru valin úr og koldíoxíðstyrkur þeirra sýna teiknaður sem fall af hitastigi. Þetta er birt á mynd 3.17. Þar sést, að valið hitastig hefur lítil áhrif á niðurröðun hola eftir gasmagni neðri æða. Gasinnihaldið er eins og fyrr segir nokkuð breytilegt, hæst í KG-10 en lægst í KW-1.

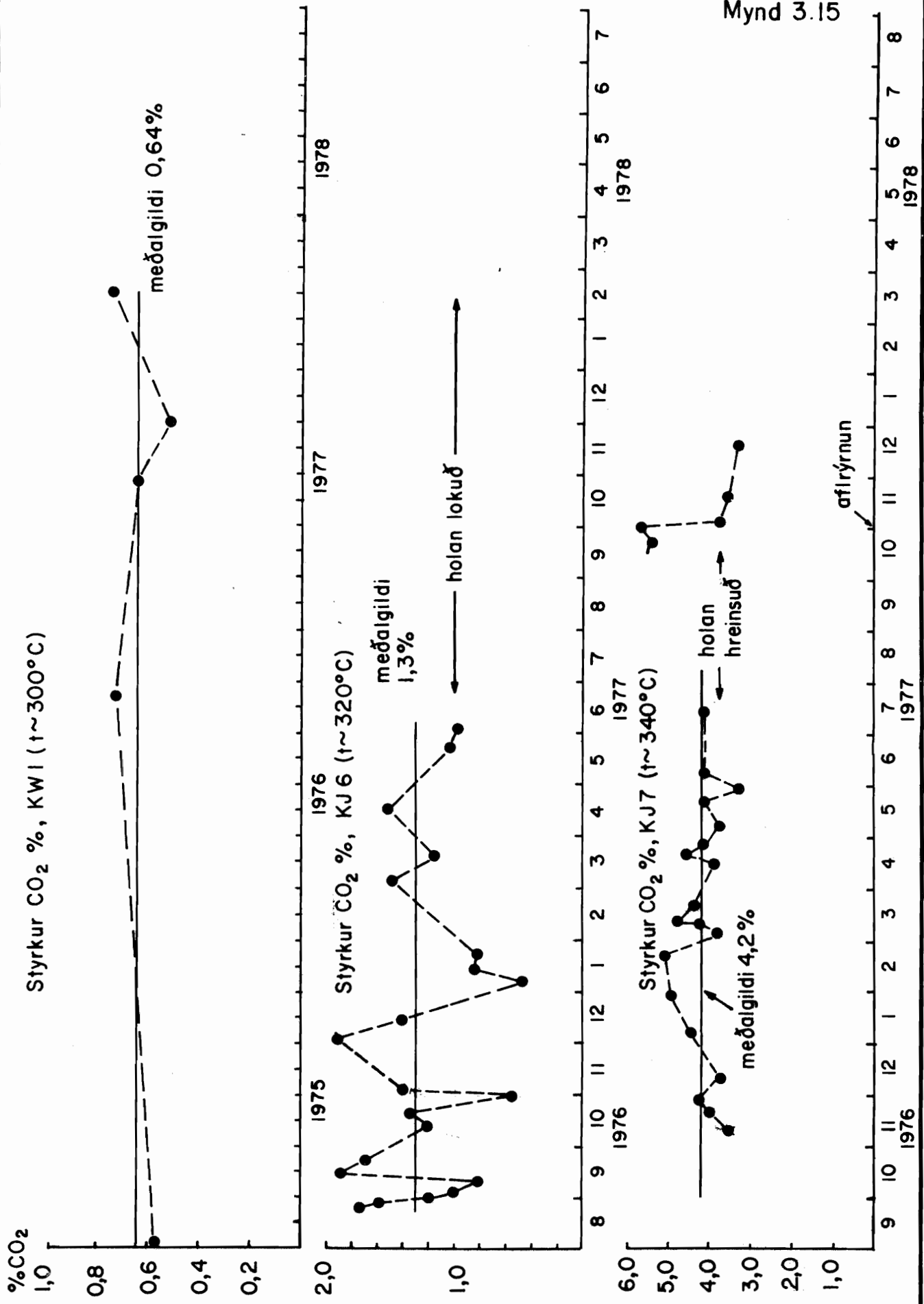
Koldíoxíð í innstreymi neðri æða er svo mikið, að það hefur veruleg áhrif á suðuprýsting við gefið hitastig. Ef gert er ráð fyrir, að allt gasið sé leyst í vatnsfasa, má ákvarða þann lágmarks þrýsting, sem þarf til að hindra suðu(12). Á mynd 3.18 eru sýndir ferlar, fyrir valin meðalsýni úr hverri holu, er lýsa þessum lágmarks þrýstingi sem falli af hitastigi. Sé aftur á móti gert ráð fyrir, að innstreymi sé vatnsgufublanda með varmainnihaldi því, sem reiknað er í kafla 3.3, má finna dreifingu gassins milli vatns og gufu. Þetta veldur því, að hlutþrýstingur koldíoxíðs og þar af leiðandi einnig heildarþrýstingur verður lægri. Á mynd 3.18 sýna heildregnir ferlar suðuprýsting slíkrar vatnsgufublöndu fyrir sömu sýni. Einnig eru sýnd svæði, sem afmarkast af hámarks-þrýstingi fyrir hverja holu og suðuprýstingi vatns.

Við sjáum strax, að holur KG-10 og KJ-7 hljóta að taka inn vatns-gufu-blöndu, ef þær eiga að uppfylla öll skilyrði um hita og þrýsting ásamt því að vera svo gasríkar sem raun ber vitni. Það er á mörkunum, að innstreymi í KW-1 og KJ-6 geti verið vatnsfasi, en vel hugsanlegt með holu KJ-11, ef eingöngu fyrirtalin skilyrði eru tekin með í reikninginn. Þessar niðurstöður eru lóð á vogarskálar þeirrar kenningar, að neðri hluti jarðhitakerfisins sé vatns-gufublanda. Það vegur þá á móti, að koldíoxíð leitar frekar í gufu en vatn þegar vatn sýður í bergi. Þetta veldur ójafnvægi milli bergs og vatns og koldíoxíð leysist úr berginu. Hversu hratt það gerist er ekki vítað en frekar er talið, að hár hiti auki hraðann. Það er því hugsanlegt, að við upphleypingu holu byrji suða í berginu, sem orsaki ójafnvægi og gasaukningu í holurennisli. Á móti þessu mælir þó, að í KG-10 mældist mest koldíoxíð strax eftir upphleypingu.



Styrkur koldíoxíds í nedri æðum KW1, KJ6 og KJ7

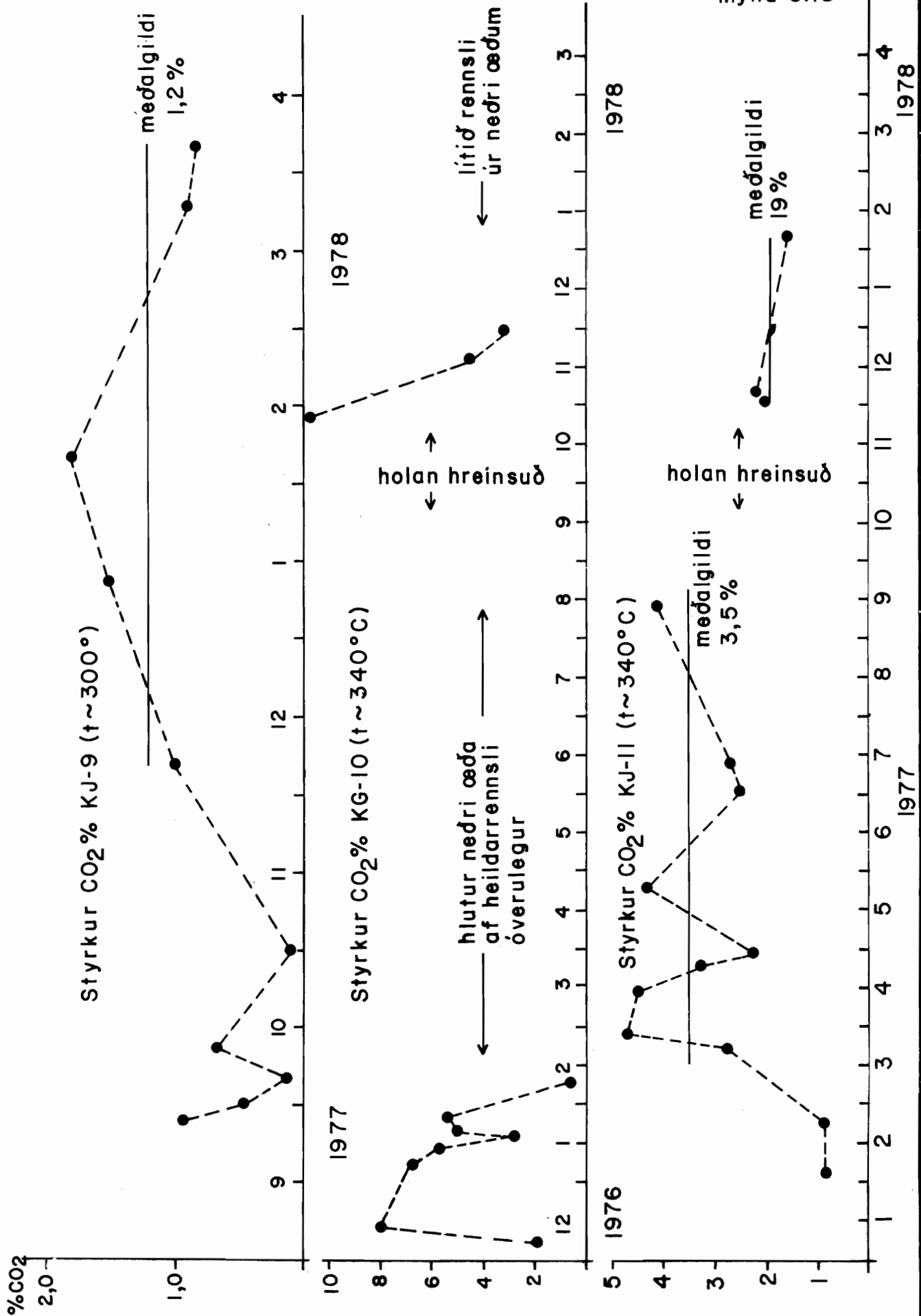
Mynd 3.15





Styrkur koldíoxíds í neðri æðum
KJ-9, KG-10, KJ-11

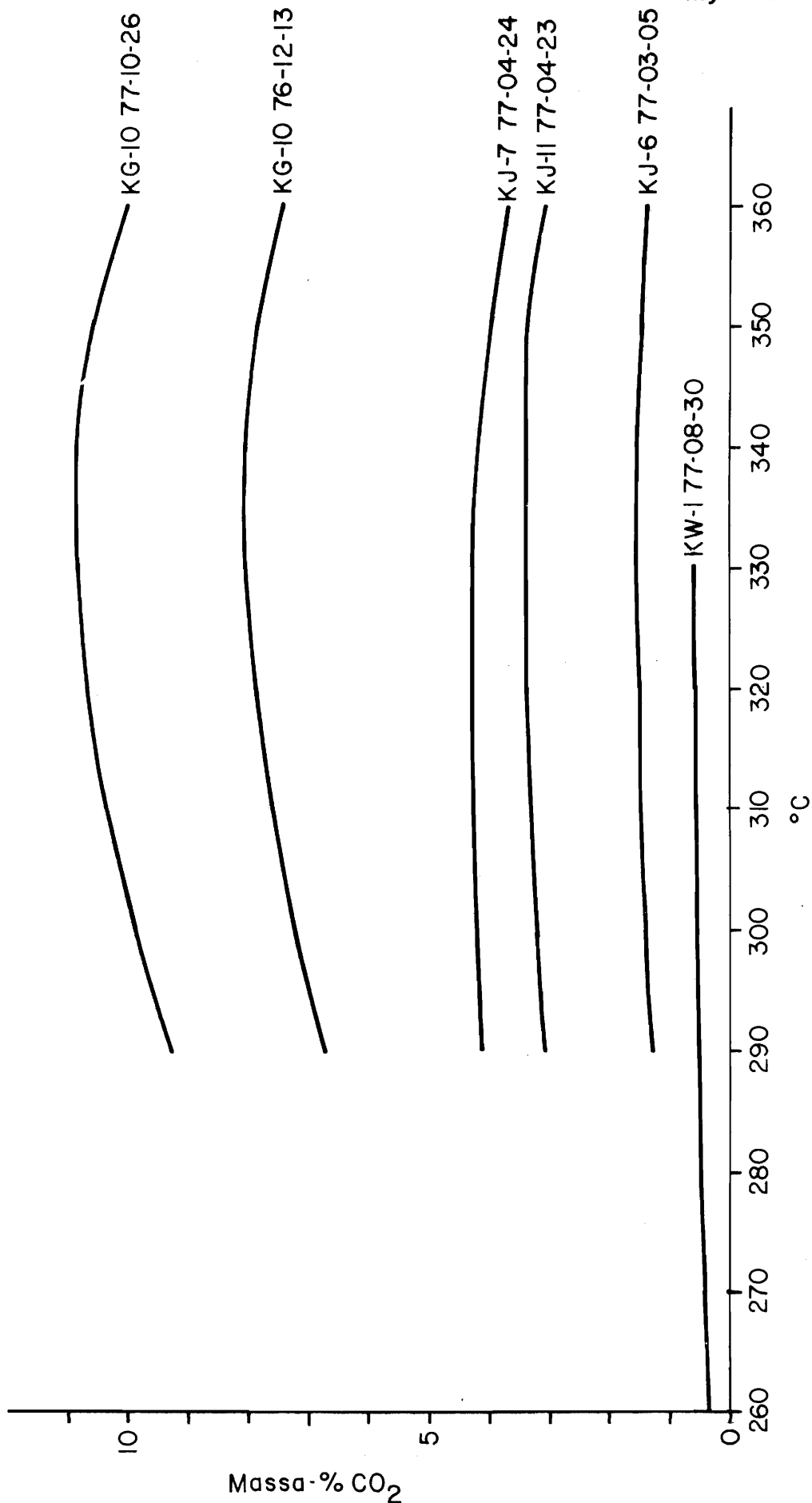
Mynd 3.16





Styrkur koldíoxíds í innstreymi úr neðri hluta
jarðhitakerfisins í Kröflu

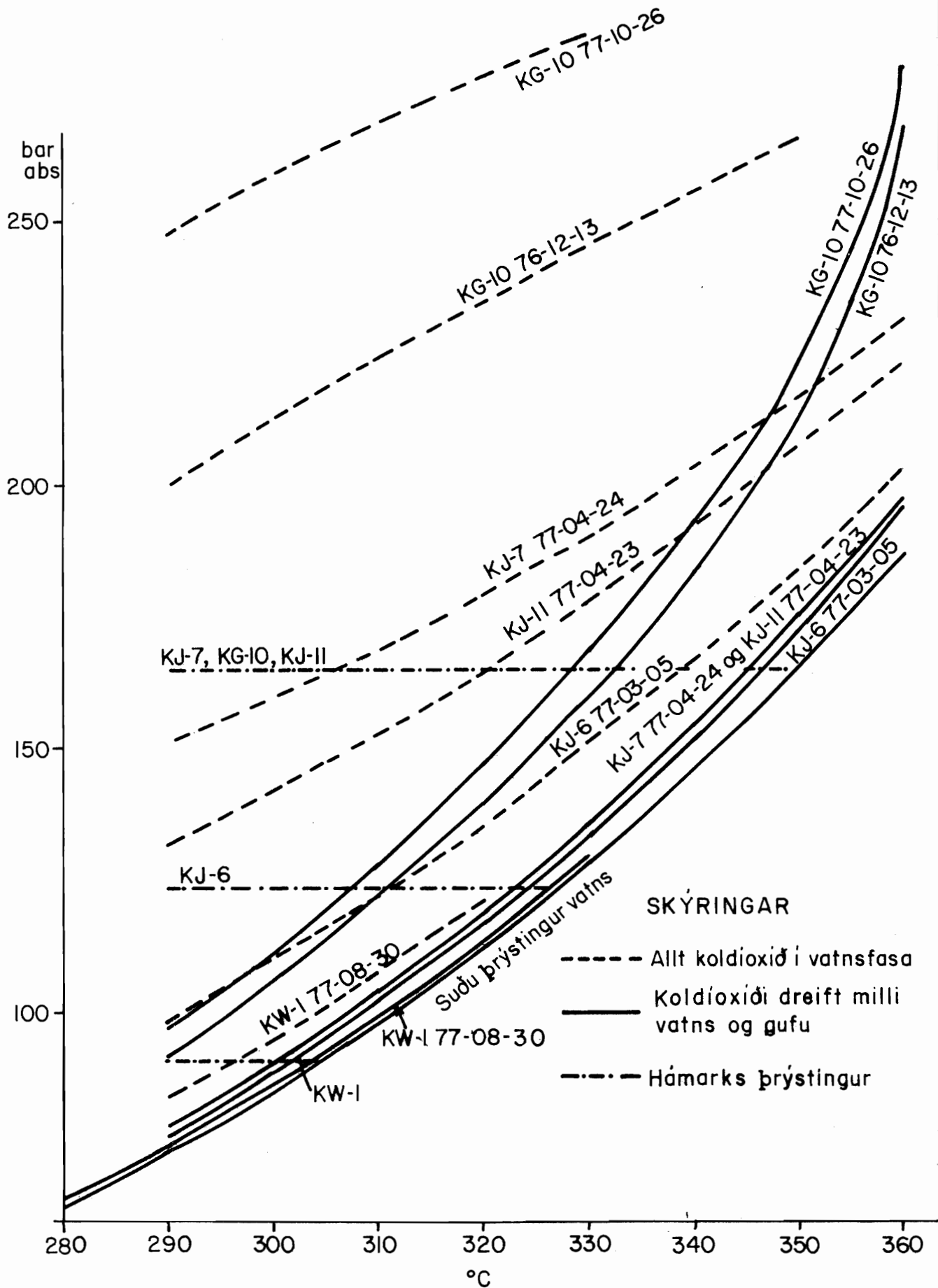
Mynd 3.17





Suðuþrýstingur innstreymis úr neðri hluta jarðhitakerfisins í Kröflu

Mynd 3.18



3.5 Gasstyrkur, ástand og streymi jarðhitavökvans.

Meðalsýni úr hverri holu voru valin með hliðsjón af meðalgildum fyrir varma- og gasinnihald (sbr. töflu 3.3 og 3.4), og gasstyrkur þeirra reiknaður, miðaður við líklegt hitastig neðri æða (sbr. töflu 3.2). Niðurstöður eru í töflu 3.5. Þær eru settar inn á flöt þann, er sker Hveragil og dýpri æðar, (kafla 3.2) á myndum 3.19 -3.21 og hlutföllin H_2/H_2S og CO_2/H_2S á myndum 3.22 og 3.23. Eins og rætt er í kafla 2.2 hefur hiti og suða mikil áhrif á styrk gass í djúpvatni jarðhitakerfa. Eftirfarandi jafnvægi eru annað hvort til staðar í jarðhitavatni eða styrkur gastegunda leitar í átt að þessum jafnvægjum:

1. Jafnvægi gastegunda við vatn og steindir í umlykjandi bergi.
2. Jafnvægi í dreifingu gastegunda milli vatns- og gufufasa.

Þessi jafnvægi eru háð hita og þrýstingi jarðhitavökvans. Í fyrsta lagi eykst styrkur gastegundanna H_2 , H_2S og CO_2 með hækkingu hitastigi ásamt því að hlutfallið H_2/H_2S hækkar. Í öðru lagi er leysni brennisteinsvetnis (H_2S) í vatni meiri en koldíoxíðs (CO_2), en leysni vetnis (H_2) í vatni minnst. Allar gastegundirnar leita frekar í gufufasa en vatnsfasa. Eftirfarandi ferli valda röskun á fyrirtöldum jafnvægjum:

1. Vökvastreymi
2. Suða, afgösun vatns
3. Afgösun kviku, gasaukning

Ef vökvastreymi um berg, sem hefur annað hitastig en vökvinn, eru gastegundir ekki í jafnvægi. Nýtt jafnvægisástand kemst á með því að gas leysist úr berginu, ef vatnið er undirmettað, eða þá að gasstyrkur minnkar í vatninu vegna myndunar nýrra steinda, ef vatnið er yfirmettað. Suða eða afgösun vegna þrýstibreytinga veldur undirmettun í vatnsfasa. Hlutföllin H_2/H_2S og CO_2/H_2S lækka í vatnsfasanum en hækka í gufufasanum. Að síðustu inniheldur kvika á miklu dýpi gastegundir, sem rjúka úr henni við kvikuinnskot og þrýstingslökkun. Þetta getur valdið gasaukningu og yfirmettun í jarðhitakerfinu. Hér á eftir verður rætt um þá þætti, sem ráða styrk hveggundar fyrir sig við jafnvægisástand.

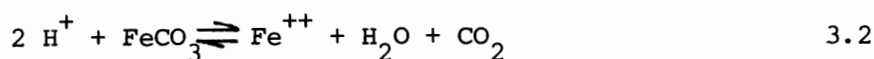
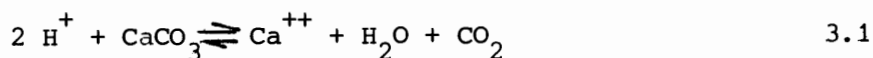
Koldíoxíð (CO_2). Sýnt hefur verið fram á að styrkur koldíoxíðs í jarðhitavatni sem er í jafnvægi við

TAFILA 3.5

Hola nr.	Sýni nr.	Dags.	H ₂ O kJ/kg	H ₂ kJ/kg	t ₂ °C	m ₁ %	m ₂ %	Y ₂ %	CO ₂ (A ₂) ppm	H ₂ S (A ₂) ppm	H ₂ (A ₂) ppm
KW-1	KRAD08771161	770830	1676	2110	300	35.9	64.1	54.8	5080	447	12.5
KJ-6	KRAD03771034	770305	1571	1946	320	35.9	64.1	38.6	14800	262	11.1
KJ-7	KRAD04771086	770424	2221	2409	340	12.5	87.5	78.0	41300	347	34.0
KJ-9	KRAD12771206	771206	1320	1425	300	31.1	69.9	5.7	10000	167	1.2
KG-10	KRAD12760184	761213	1362	2039	340	59.5	40.5	42.0	82000	1780	7.2
KG-10	KRAD10771193	771026	1341	2026	340	60.9	39.1	40.7	109000	2620	26,3
KJ-11	KRAD04771083	770423	1299	2200	340	69.4	30.6	57.7	33000	161	2.4

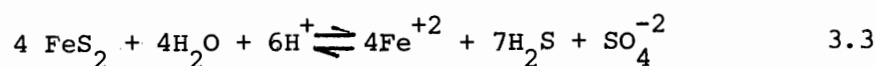
steindir í bergi, ákvarðist eingöngu af hitastigi (13). Efnajafnvægi við steindir í berginu ákvarða hlutfallið $(M^{n+})/(H^+)$ fyrir tiltekið hitastig, og veldur þetta því, að styrkur koldíoxíðs í vatninu stjórnast af úrskolun eða útfellingu karbonata. Þetta er háð því að í berginu sé nægilegt karbonat $(M_x CO_3)$ til að viðhalda jafnvægi við tiltekinn hita. Að því getur komið, að allt karbonat hverfi við ummyndun bergsins og styrkur koldíoxíðs í vatni takmarkist af því. Talið er að kalsít ($CaCO_3$) sé sú steind, sem mestu ráði um þetta jafnvægi en önnur karbónöt svo sem síderit ($FeCO_3$) geta e.t.v. einnig haft áhrif.

Eftirfarandi jöfnur gilda um leysni kalsíts og síderits:



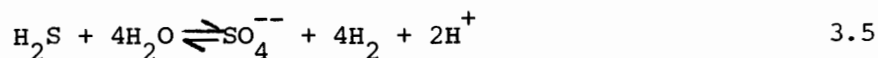
Brennisteinsvetni (H_2S)

Á sama hátt og styrkur koldíoxíðs ræðst af leysni karbonats má álykta, að styrkur brennisteinsvetnis ráðist af leysni járn-brennisteinssambanda svo sem pyríts og pyrrhótíts (14). Eftirfarandi jöfnur gilda um leysni pyríts (FeS_2) og pyrrhótíts (FeS):



Vetni (H_2)

Styrkur vetnis í jarðhitavökva, sem er í jafnvægisástandi ræðst fyrst og fremst af jafnvæginu:



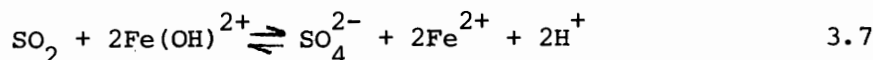
Suða og afgösun. Jafnvægi í dreifingu gastegunda milli vatns og gufu næst mjög fljótt aftur eftir röskun. Á mynd 2.1 er sýnd leysni CO_2 , H_2S , N_2 og H_2 í sjóðandi vatni við mismunandi hita. Þar sést, að á hitabilinu 100-370°C leita öll gösin frekar í gufufasa en vatnsfasa og að leysni vetnis er minnst, þar næst köfnunarefnis, þá koldíoxíðs, en brennisteinsvetni leysist best í vatni. Ef suða hefst í jarðhitakerfum,

rjúka gastegundir úr vatnsfasanum og fyrirtalin jafnvægi milli steinda bergsins og gastegunda í vatni raskast. Styrkur gastegunda í vatninu nálgast jafnvægi á ný við tiltekinn hita. Að því getur komið, að styrkur koldíoxíðs og brennisteinsvetnis takmarkist af magni karbónata og brennisteinssambanda í berginu og úrskolun hætti. Í Kröflu, holum KG-3 og KG-4, fannst lítið kalsít í þunnsneiðum fyrir neðan 900-1100 m dýpi (15).

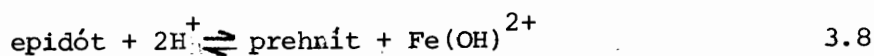
Afgösum kviku. Koldíoxíð (CO_2), vetni (H_2) og brennisteinsdíoxíð (SO_2) eru ásamt vatnsgufu helstu gastegundir í kvikugösum (16). Brennisteinsdíoxíð er súrust þessara gastegunda og myndar sterka sýru ef hún leysist í vatni.



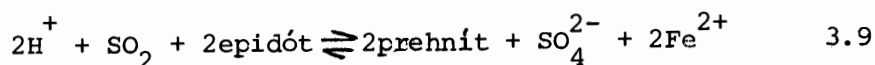
Brennisteinsdíoxíð hvarfast við þrígild járnambönd í lausn (17) samkvæmt



Þrígild járnambönd myndast við ummyndun epidóts í prehnít, en epidót finnst í miklu mæli í holum í Kröflu neðan 600 m (15).



Jafnvægi 3.7 og 3.8 saman gefa:



Þetta hefur í för með sér, að styrkur Fe^{2+} og SO_4^{2-} eykst og hefur áhrif á jafnvægin 3.3, 3.4 og 3.5 þannig að myndun H_2S og útfelling FeS og FeS_2 eykst. Það styður þessa útleiðslu, að samfara gasaukningu í KG-3, eftir gosið 1975, jókst styrkur SO_4^{2-} í KG-4 úr 180ppm í 2200ppm.

Koldíoxíð (CO_2) leysist verr í vatni en SO_2 og er veikari sýra. Það er ekki afoxunarmiðill eins og SO_2 og hvarfast þar af leiðandi ekki við epidót. Það hefur þó áhrif á útfellingu karbónata samkvæmt jöfnu 3.1 og 3.2 en hátt hitastig minnkar upptöku koldíoxíðs í bergi samkvæmt fyrirtöldum jafnvægjum.

Vetni (H_2) er ósúr gastegund sem leysist illa í vatni. Það hvarfast ekki við berg nema óbeint samkvæmt jöfnu 3.5. Vetni er því það kviku-gas sem streymir hraðast gegnum jarðhitakerfið og minnkar örast. Koldíoxíð leysist mun betur í vatni og hvarfast við berg, sem veldur hægara streymi þess gegnum jarðhitakerfið og lengri útskolunartíma. Brennisteinsdíoxíð hvarfast svo gjarnan við berg, að áhrif þess á jarðhitavökvann verða eingöngu óbein vegna myndunar brennisteinsvetnis.

Í ljósi fyrirtalinna eiginleika gastegunda í jarðhitavatni má reyna að skýra myndir 3.19-3.23. Fyrsta mynd (3.19) sýnir styrk koldíoxíðs í neðri hluta. Í kafla 3.4 er sýnt fram á, að þessi hái styrkur er eingöngu mögulegur í sjóðandi vatnskerfi, nema e.t.v. í KJ-11. Einnig er ljóst að svo hár styrkur í vatni er óhugsandi eingöngu sem afleiðing úrleysingar úr bergi, því ekki er nægilegt karbónat þar til staðar til að fá fram þennan háa styrk koldíoxíðs. Því verður að álykta sem svo, að koldíoxíð sé upprunnið úr kviku og streymi frá henni til yfirborðs. Hóla KG-10 er samkvæmt því næst innstreymi kvikuvessa en að öðru leyti ákvarðast styrkur koldíoxíðs af þrýstingi og e.t.v. berghita á hverju dýpi. Næsta mynd (3.20) sýnir styrk brennisteinsvetnis í innstreymi. Þar sést, að hann gerist hæstur í holum KG-10, KW-1, KJ-7 og KJ-6. Samkvæmt fyrirsögðu um áhrif kvikugasa á jarðhitakerfi má álykta að áhrifa brennisteinsdíoxíðs (SO_2) gæti þar meira en annars staðar. Þetta er í samræmi við þá reynslu, að holur KJ-6, KJ-7 og KG-10 hafa stíflast af járn-kísilútfellingum (13).

Mynd 3.21 sýnir styrk vetnis (H_2) í innstreymi. Sú mynd er að mörgu leyti svipuð mynd 3.20 en áberandi er þó hátt gildi við holu KJ-7. Þar sem vetni er torleyst í vatni þá má ætla að það sé nær allt í gufufasa jarðhitakerfisins. Hinn hái styrkur í KJ-7, KG-10, KW-1 ásamt KJ-6 bendir til þess, að innstreymi sé yökvi sem hafi soðið aðeins einu sinni eftir innstreymi kvikuvessa. Lægri styrkur í KJ-9 og KJ-11 bendir til, að vökvinn sem inn streymir hafi soðið áður og vetni tapast þá með gufunni. Nú samanstendur kvikugas að miklu leyti af vetni og er því styrkur vetnis í öllum holum of lágur miðað við styrk koldíoxíðs. Líklegt er því, að vetni, ættað úr kvikugasi, sé að mestu horfið úr jarðhitakerfinu, enda var í gosinu 1975 vart við vetnisaukningu í KG-3 áður en koldíoxíðaukning átti sér stað (3). Myndir 3.22 og 3.23 sýna hlutföllin

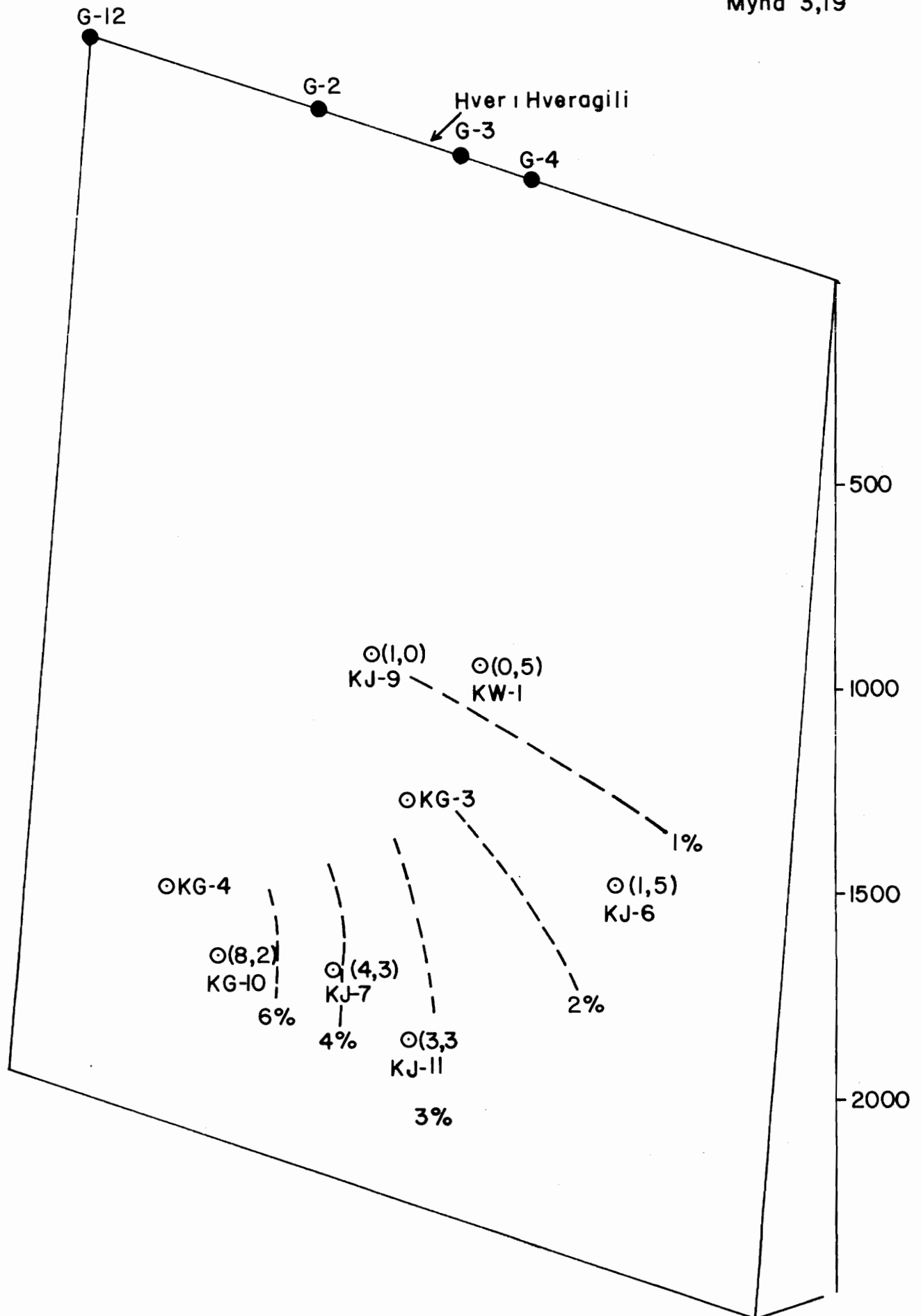
H_2/H_2S og CO_2/H_2S í neðri hluta. H_2/H_2S hlutfallið gefur til kynna suðu- eða afgösunarstig jarðhitavökvans en CO_2/H_2S hlutfallið gefur meiri hugmynd um vegalengd þá sem vökvinn hefur streymt um bergið eftir að hann kemst í snertingu við kvikuessa.

Ef fyrirtaldar myndir eru dregnar saman má fá hugmynd um líklegasta ástand og streymi jarðhitavökvans í neðri hluta kerfisins. Þetta er birt á mynd 3.24.



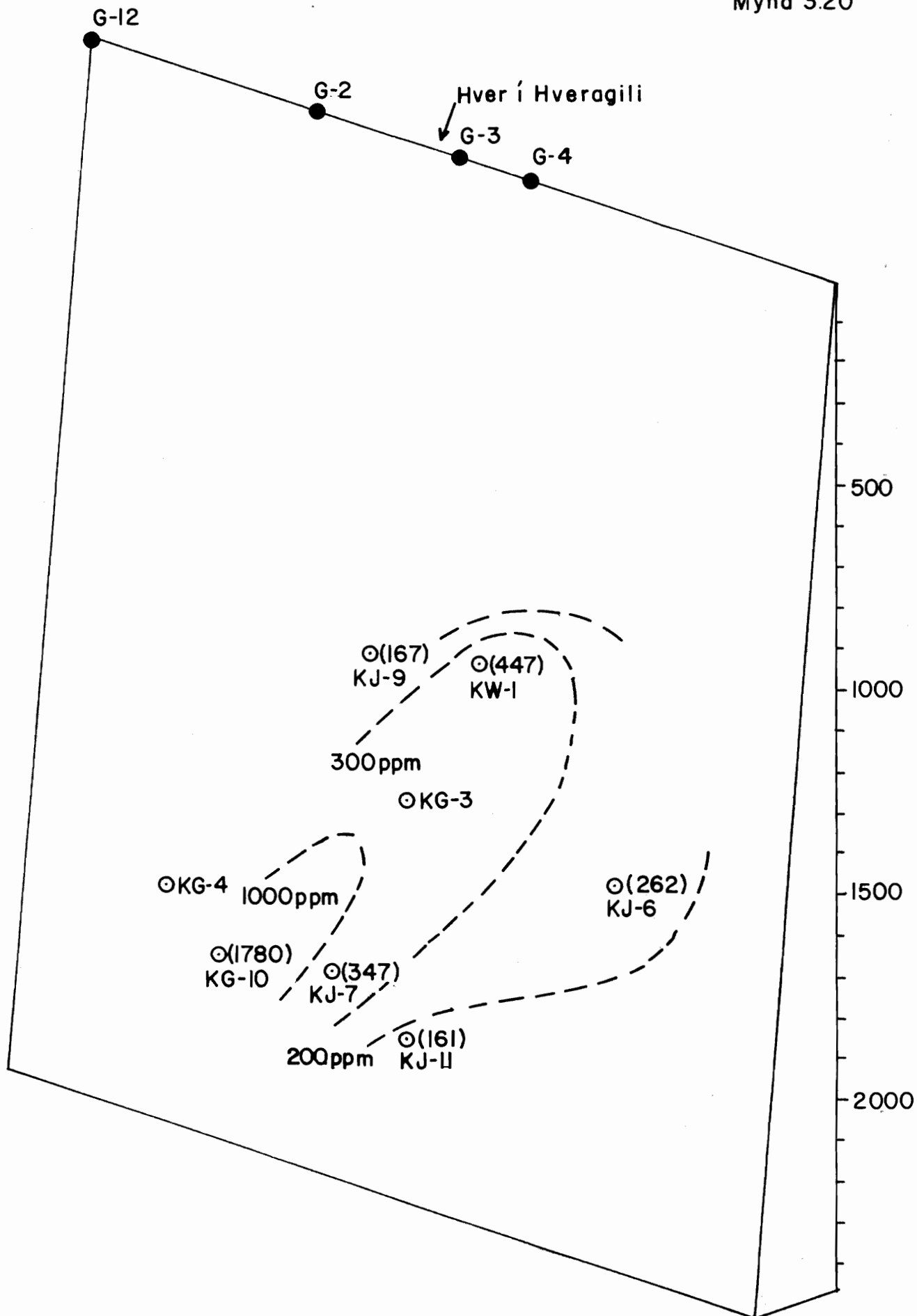
Styrkur CO₂ í nedri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu

Mynd 3,19





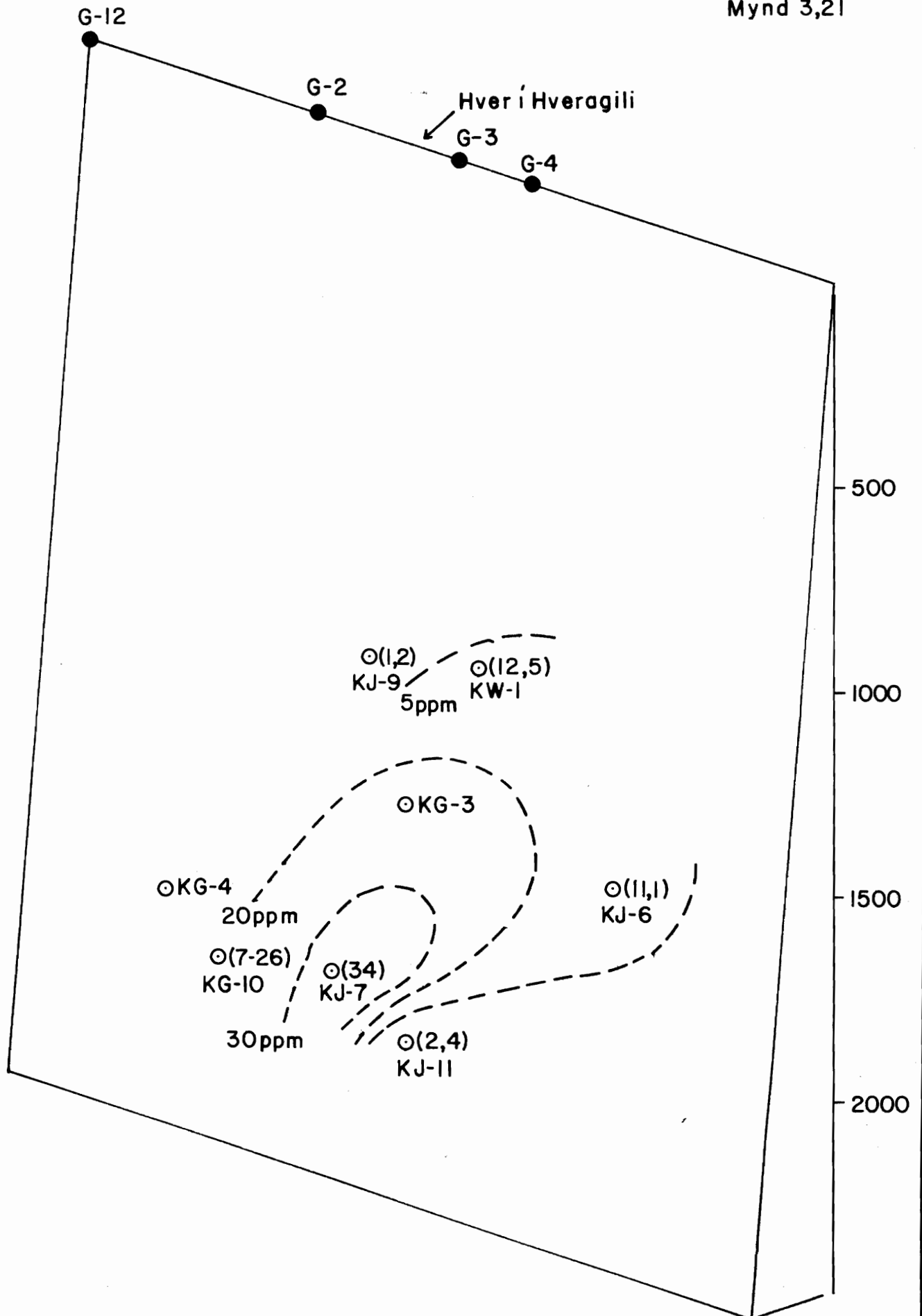
Mynd 3.20





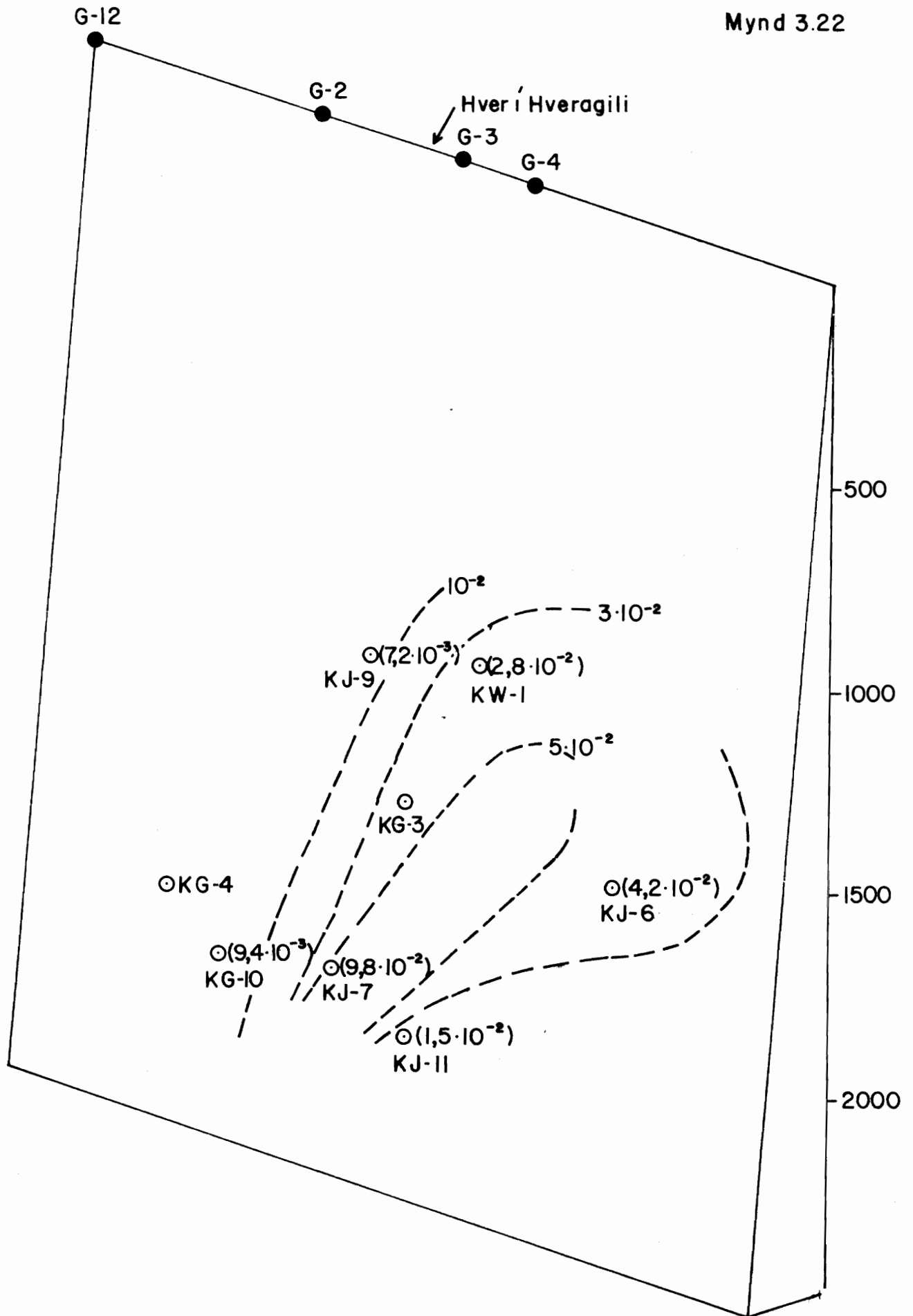
Styrkur H₂ í neðri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu

Mynd 3,21



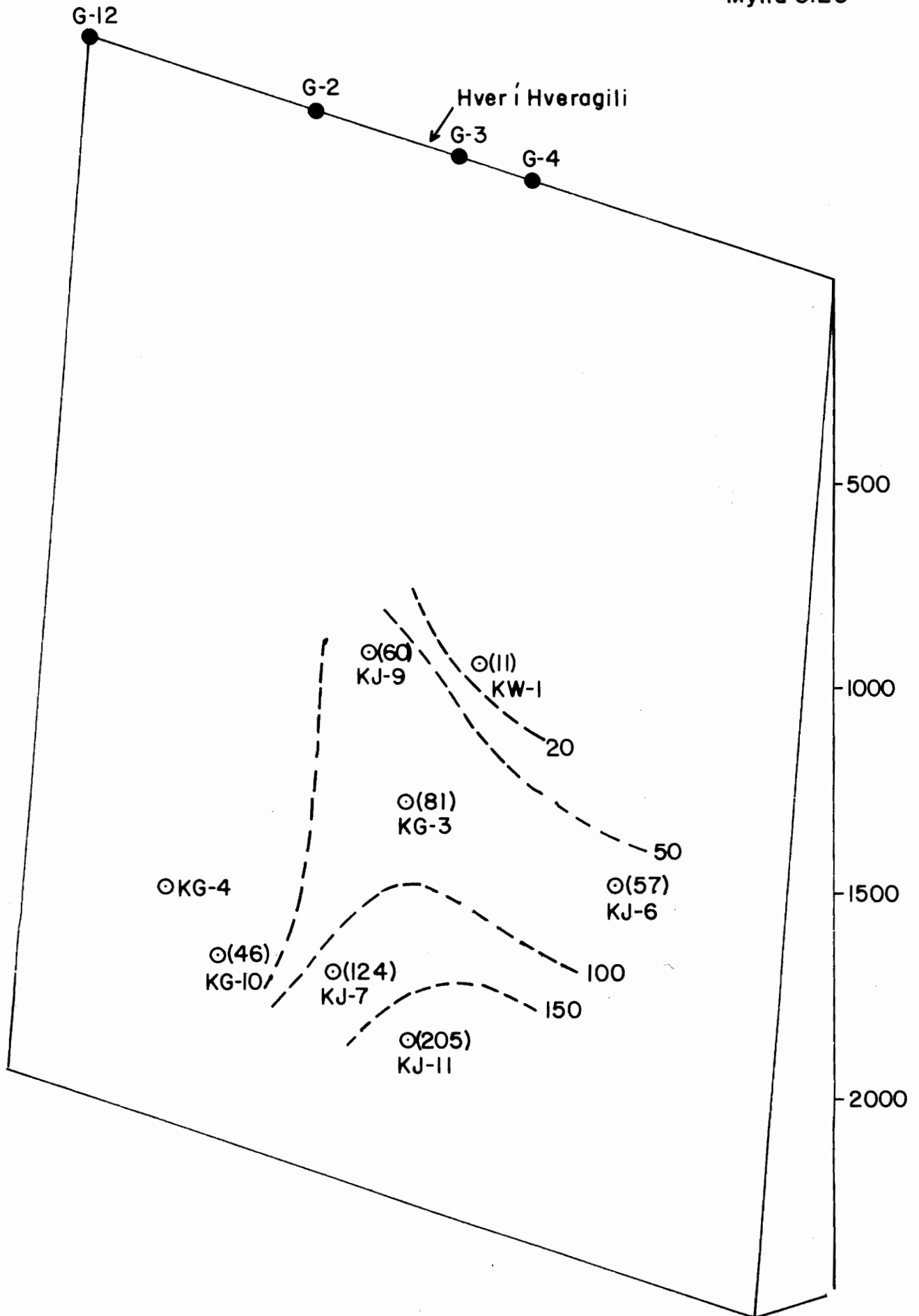


Mynd 3.22





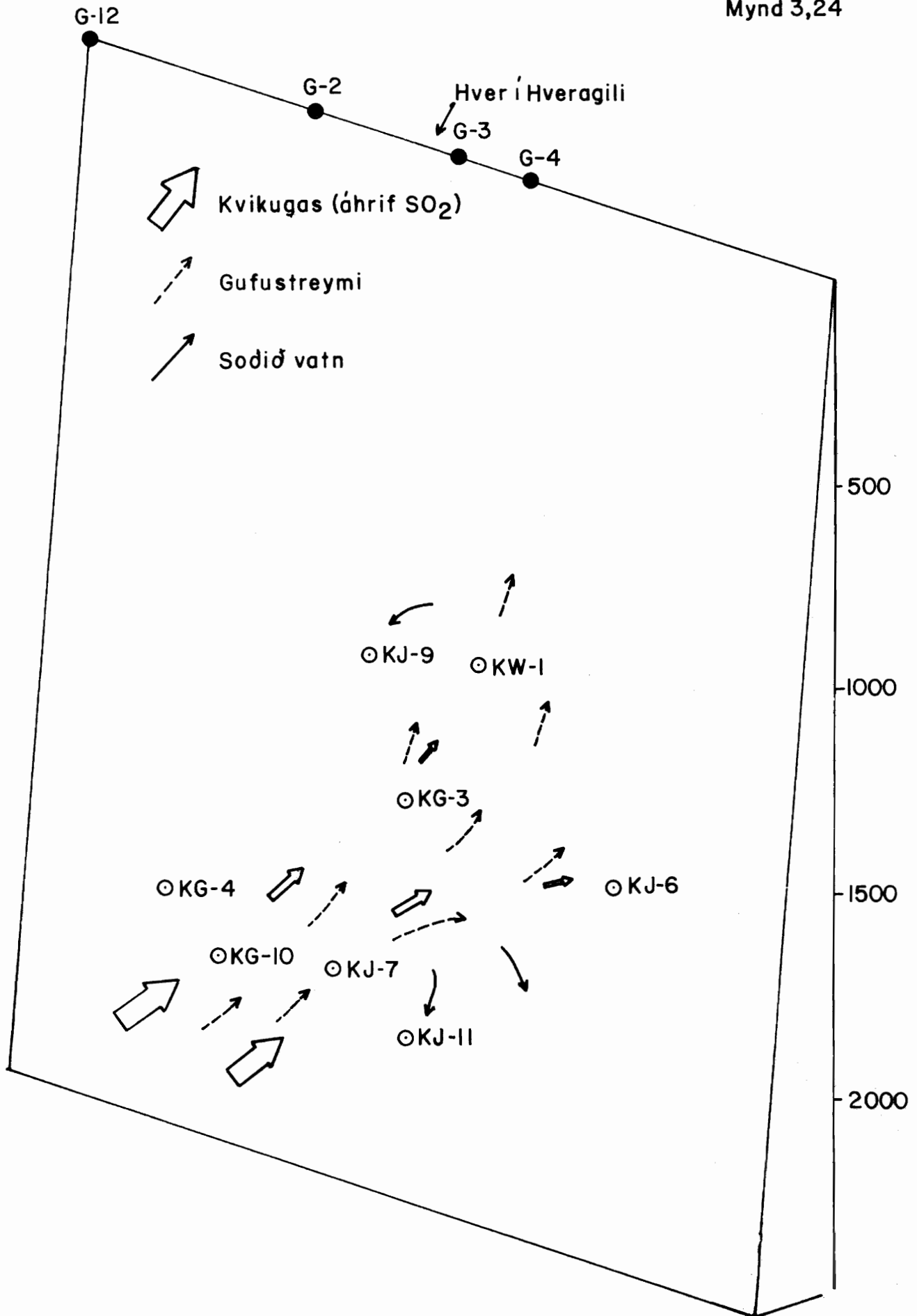
Mynd 3.23





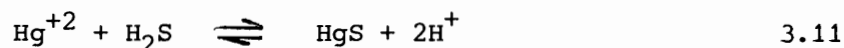
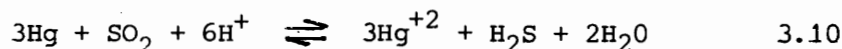
Streymi í neðri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu

Mynd 3,24



3.6 Kvikasilfur

Eins og fram kemur í kafla 2.5 er kvikasilfur í jarðhitayökvanum að öllum líkindum kvikuættar. Hinn mikli styrkur þess í holu KJ-7 (sbr. töflu 3-6) er í samræmi við þá hugmynd. Kvikasilfrið berst væntanlega frá kviku í fylgd með öðrum kvikugösum, þ.á.m. brennisteinsdíoxíði, og gæti oxast að e-u marki fyrir tilverknað þess. Síðan myndi fylgja felling kvikasilfursúlfiðs (sbr. 2.5).



Má því búast við nokkurri styrkminnkun, meðan áhrifa brennisteinsdíoxíðs gætir. Við suðu og afgösum í jarðhitakerfinu ætti kvikasilfur að sitja að mestu eftir í vatnsfasa (sbr. mynd 2.1), og má því búast við tiltölulega háum styrk í holum, er taka inn soðinn vatnsfasa (KJ-9, KJ-11, sbr. mynd 3.24). Styrkur kvikasilfurs í neðri hluta hefur verið reiknaður, miðaður við að styrkur þess í efri hluta sé 132 ng/kg (styrkur í holu KG-8, sbr. 2.5), og eru niðurstöður skráðar í töflu 3-6, og teiknaðar inn á mynd 3.25.

TAFLA 3-6 Styrkur kvikasilfurs í neðri hluta jarðhitakerfis Kröflu

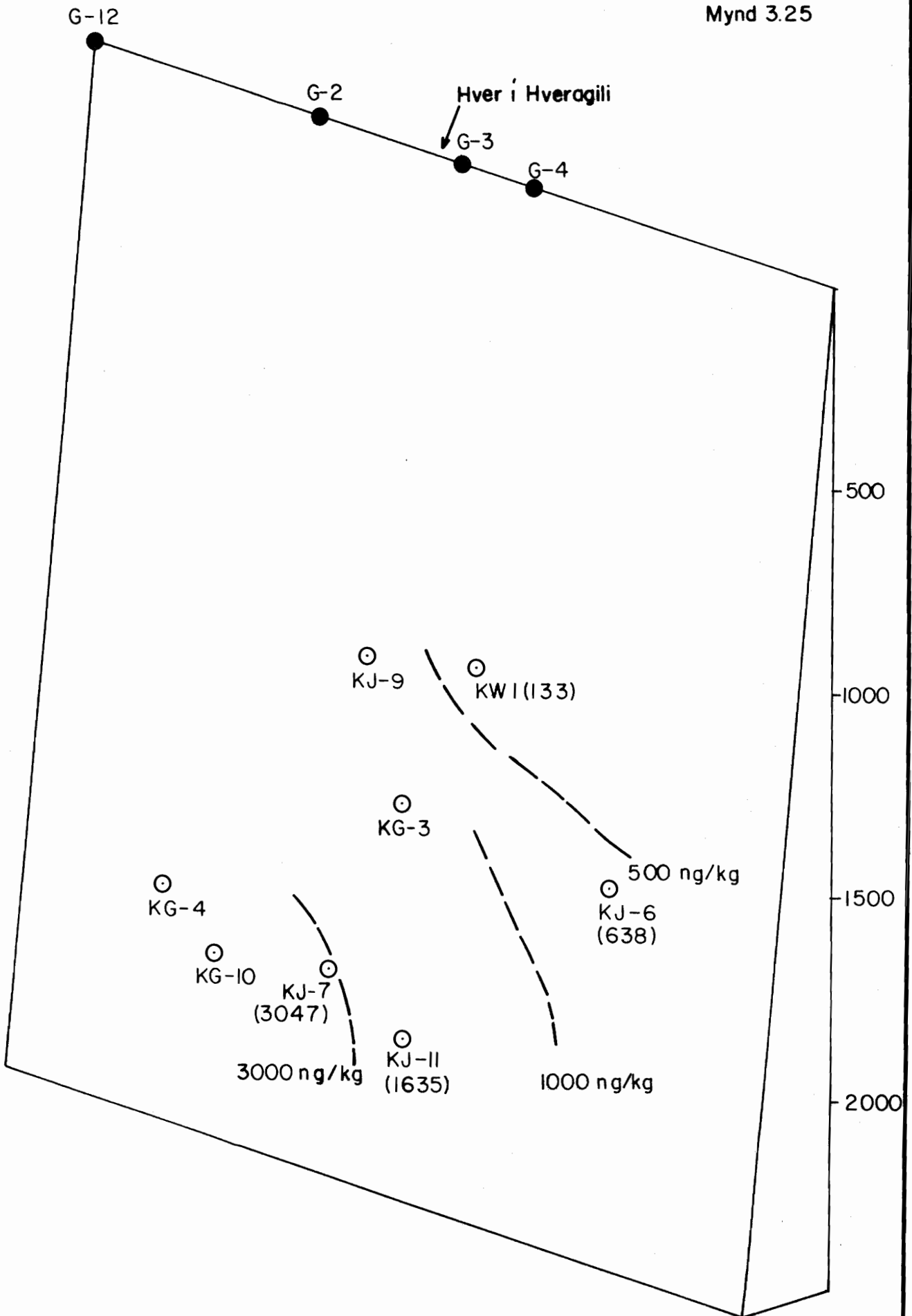
Hola nr.	Dags.	Hg ng/kg
KW-1	1977-08-30	133
KJ-6	1976-11-03	638
KJ-7	1976-11-02	3047
KJ-11	1977-08-30	1635

Sé þessi mynd borin saman við mynd 3.24, er athyglisvert, að styrkur í holu KJ-11, er töluverður og kemur það heim við þá hugmynd, að þar sé að miklu leyti um soðinn vökvasfasa að ræða, en minnkun frá holu KG-10 til holu KJ-7 gæti stafað af áhrifum brennisteinsdíoxíðs. Í holu KJ-6 er styrkur enn minni, en þangað berst e.t.v. blanda af vatni og gufu. Minnstur er kvikasilfursstyrkur í KW-1 en þangað berst mest gufufasi og e.t.v. kvikugas. Væntanlega gætir áhrifa brennisteinsdíoxíðs ekki lengur í kvikuginu og sennilega berst sáralítið kvikasilfur með gufufasa. Efri hluti jarðhitakerfisins tekur síðan við vökvanum líkum því, sem hann er í holu KW-1 (sbr. 2.5) og má ntla að þar sé þetta aðalvandinn í tilviki.



Styrkur Hg í neðri hluta jarðhitakerfisins við Kröflu

Mynd 3.25



3.7 Radon

Eins og áður getur (2.6) er líklegt, að radon í jarðhitakerfinu eigi sér tvenns konar uppruna.

Radon í neðri hluta jarðhitakerfisins hefur verið reiknað í völdum sýnum, miðað við, að styrkur þess í efri hluta sé 210 dpm/kg. (sbr. 2.6). Niðurstöður þeirra reikninga eru skráðar í töflu 3-7 og færðar inn á mynd 3.26.

TAFLA 3-7 Styrkur radons í neðri hluta jarðhitakerfis Kröflu

Hola nr.	Dags	Rn dpm/kg
KW-1	1977-08-30	2014
KJ-6	1978-05-27	1038
KJ-7	1977-10-20	5002
KJ-9	1977-10-11	342
KG-10	1977-10-26	13.959
KJ-11	1977-07-12	640

Hinn mikli styrkur í holum KG-10 og KJ-7 bendir sterklega til kviku-uppruna, og sú minnkun, er fylgir stafar af eyðingu vegna geislunar, þar sem radon er kemískt óvirkt.

Við suðu og afgösun ætti radon að fylgja gufufasa og er því við litlum styrk þess að búast í holum, sem taka inn soðinn vatnsfasa (KJ-9 og KJ-11, sbr. mynd 3-24), og kemur það vel heim við þessar niðurstöður. Hins vegar gæti orðið um styrkingu að ræða í holu KW-1, sem tekur inn gufufasa og kvikugas. Hefur slík styrking komið fram í sumum sýnum úr þeirri holu, einkum eftir að hún hafði blásið lengi og var farin að þorna (t.d 1978-06-29, 8552 dpm/kg).

Fari vökvinn sína leið án aðskilnaðar fasa verða engar aðrar breytingar á radonstyrk hans en minnkun vegna geislunar. Í slíkum tilvikum er unnt að meta hraða streymisins í jarðhitakerfinu. Er þá leiðrétt fyrir því radoni, sem á uppruna í klofnum radíums úr berginu, en gert er ráð fyrir, að styrkur þess sé hinn sami og í efri hluta. Til þess að fá sambærilegan radonstyrk, er miðað við hlutfall þess við koldíoxíð, og það margfaldað með styrk koldíoxíðs í holu KG-10. Auðséð er, að slíkum reikningi er ekki unnt að beita við holu KW-1, þar eð radonstyrkur þar verður mun hærri en í holu KG-10 á slíkum grundvelli. Ber að taka með í reikninginn, að jarðhitavökvinn er mun kaldari í holu KW-1 en í KG-10, og leysni koldíoxíðs því önnur. Hefur styrkur koldíoxíðs minnkað og er ekki sambærilegur við styrk þess í holu KG-10. Hins vegar eru niðurstöður fyrir holur KJ-7 og KJ-6 ekki ósennilegar. eru þær sýndar í töflu 3-8 ásamt niðurstöðum um KJ-9 og KJ-11, sem að öllum líkindum sýna lengri tíma en réttan vegna fasaaðskilnaðar við suðu og afgösun. Hins vegar má slá svipaðan varnagla um holu KJ-9 og um KW-1 hér að ofan, vegna kólnunar jarðhitavökva, og væru slík áhrif til styttingar reiknaðs tíma miðað við réttan. Reiknað er með helmingunartímanum 3.8 dögum fyrir radon-222.

TAFLA 3-8

Höla nr.	$Rn_{Kv} \cdot CO_2$ (KG-10)	Aldur miðað við KG-10 dagar
	CO_2 (KX-n) dpm/kg	
KG-10	13749	0
KJ-7	9639	1.9
KJ-6	5182	5.4
KJ-9	2414	9.9
KJ-11	1736	11.2

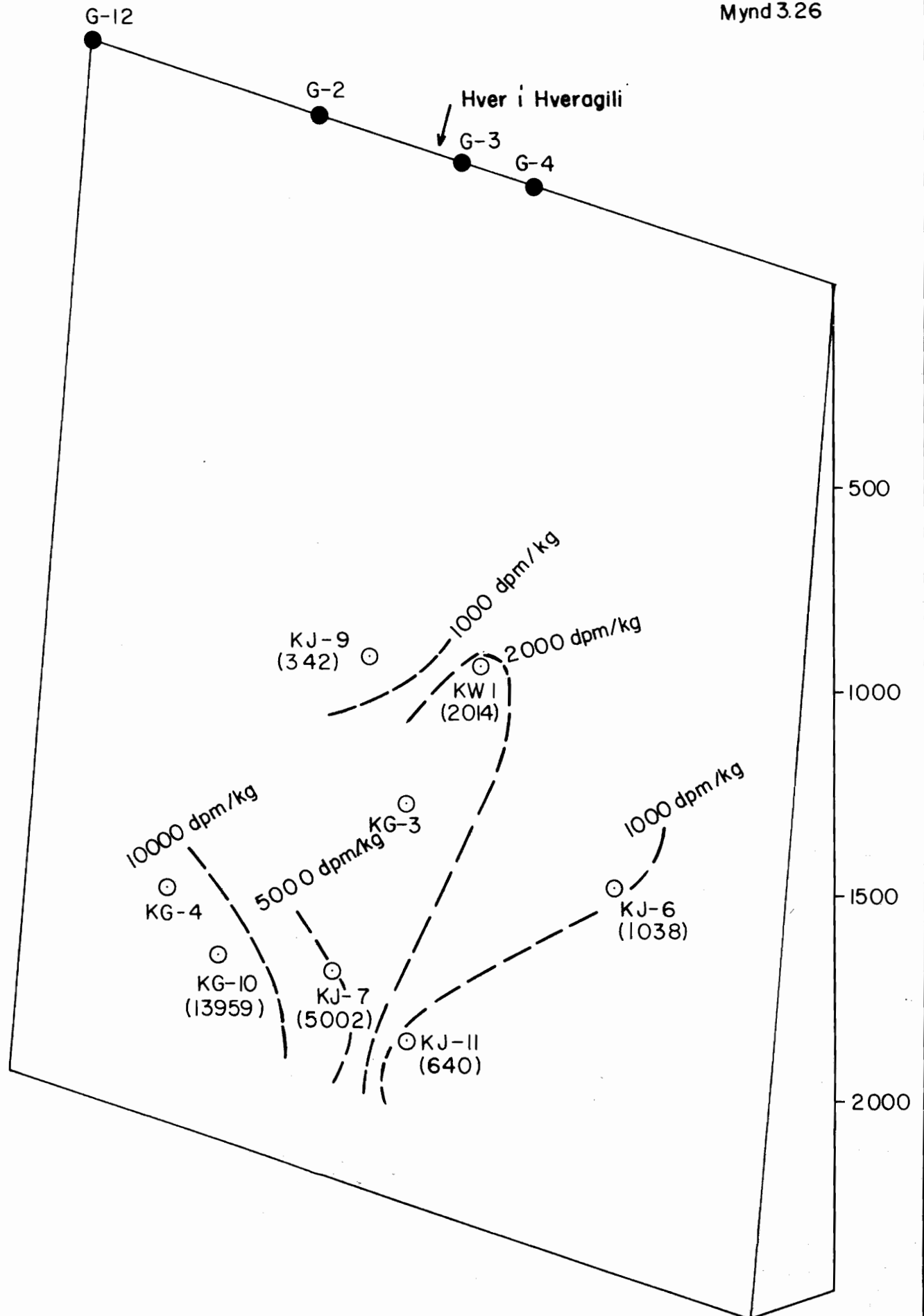
Kv = Úr kyliku

X = Upphafsstafur bors

n = Númer holu



Mynd 3.26



4. YFIRBORD

4.1 Almennt

Á mynd 4.1 er sýnd dreifing hvera og gufuauga og hvar jarðhitammýndun er að finna á Kröflusvæði. Ennfremur eru sýnd misgengi. Þessar upplýsingar eru af korti eftir Kristján Sæmundsson (18). Á myndina hafa verið teiknaðar útlínur kvikuhólfs á 3-7 km dýpi (19). Þegar myndin er skoðuð sést, að allir jarðhitastaðir og ummerki um jarðhita utan við sjálfa Leirhnjúkssprunguna falla á eða innan við mörkin, er sýna útlínur kvikuhólfs djúpt í jörðu. Þá sést einnig, að misgengi í suðurhlíðum Kröflu taka sömu stefnu og "totan"á kvikuhólfinu. Þessi misgengi hafa verið mjög virk í þeim umbrotum, sem nú ganga yfir.

Rannsóknir á efnasamsetningu gass úr hverum og gufuaugum á Kröflusvæðinu ná yfir alllangan tíma, en gasi var fyrst safnað til efnagreininga 1889 (20). Þá eru til efnagreiningar frá 1906 (21) og 1950 (22) og loks safnaði Stefán Arnórsson sýnum, er Orkustofnun gerði frumrannsókn á Kröflusvæði 1970. Í skýrslu Orkustofnunar (23), er greinir frá þeirri rannsókn, eru teknar saman allar þessar efnagreiningar og túlkaðar.

Við samanburð á efnagreiningum kemur í ljós, að hlutföll milli gastegunda breytist óverulega á þeim 80 árum sem mælingarnar ná yfir. Þá kemur einnig fram, að samkvæmt túlkun Stefáns er mest uppstreymi sunnan Vítis og fremst í Hveragili. Gashlutföll benda til þess, að berghiti sé hæstur á sömu stöðum.

Strax eftir gos í Leirhnjúk 1975 tóku Niels Óskarsson o.fl. hjá Norrænu eldfjallastöðinni að fylgjast með gassamsetningu í hverum og gufuaugum á Kröflusvæði (17). Athuganir þeirra sýna, að verulegar breytingar hafa orðið á gassamsetningu á þann veg, að hluturbrennisteinsvetnis (H_2S) og vetnis (H_2) minnkar en hlutur koldíoxíðs (CO_2) eykst að sama skapi. Þetta er í góðu samræmi við þær breytingar, sem urðu á gasstyrk í KG-3 eftir gosið í desember 1975 (3).

Árin 1977 og 1978 hefur verið safnað sýnum af gufu á Kröflusvæðinu af höfundum þessarar skýrslu. Auk þess sem athuguð voru hlutföll gastegunda á sama hátt og áður hafði verið gert, var mældur styrkur koldíoxíðs (CO_2) og brennisteinsvetnis (H_2S) í gufunni. Var það gert á þann hátt, að sýnum var safnað í sterka lútarlausn. Sýnatökustaðir, sem eru 12, eru sýndir á mynd 4.2.

Ýmsir þættir ráða styrk og hlutföllum gastegunda í gufu á yfirborði. Upphaflegur styrkur gastegunda í gufu ræðst af styrk viðkomandi gastegunda í djúpvatni, varmainnihaldi þess, og við hvaða hitastig aðskilnaður vatns og gufu fer fram. Endanlegur styrkur gastegunda í gufu á yfirborði ræðst síðan af því, hvort eitthvað af gufunni þéttist á leið sinni til yfirborðs og þá hvernig sú þétting fer fram.

Þétting veldur því, að hlutföll milli gastegunda breytast, því að þær leita mismikið yfir í þéttivatn. Þannig leitar brennisteinsvetni heldur meira yfir í þéttivatnið en koldíoxíð, en vetni leysist nánast ekkert upp í vatninu (mynd 2.1). Við þéttingu á gufu hækka því hlutföllin $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ og $\text{H}_2/\text{H}_2\text{S}$.

Auk þess sem hlutföll gastegunda breytast við þéttingu, veldur hún hækkun á styrk gastegunda í gufunni, þar sem gasið situr nánast allt eftir í gufufasanum. Mældur styrkur í gufu á yfirborði er því hámarksgildi.



Jarðhiti á Kröflusvoði

SKÝRINGAR

▲ Öskjubrot

↘ Misgengi

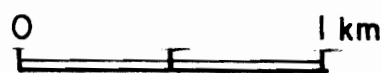
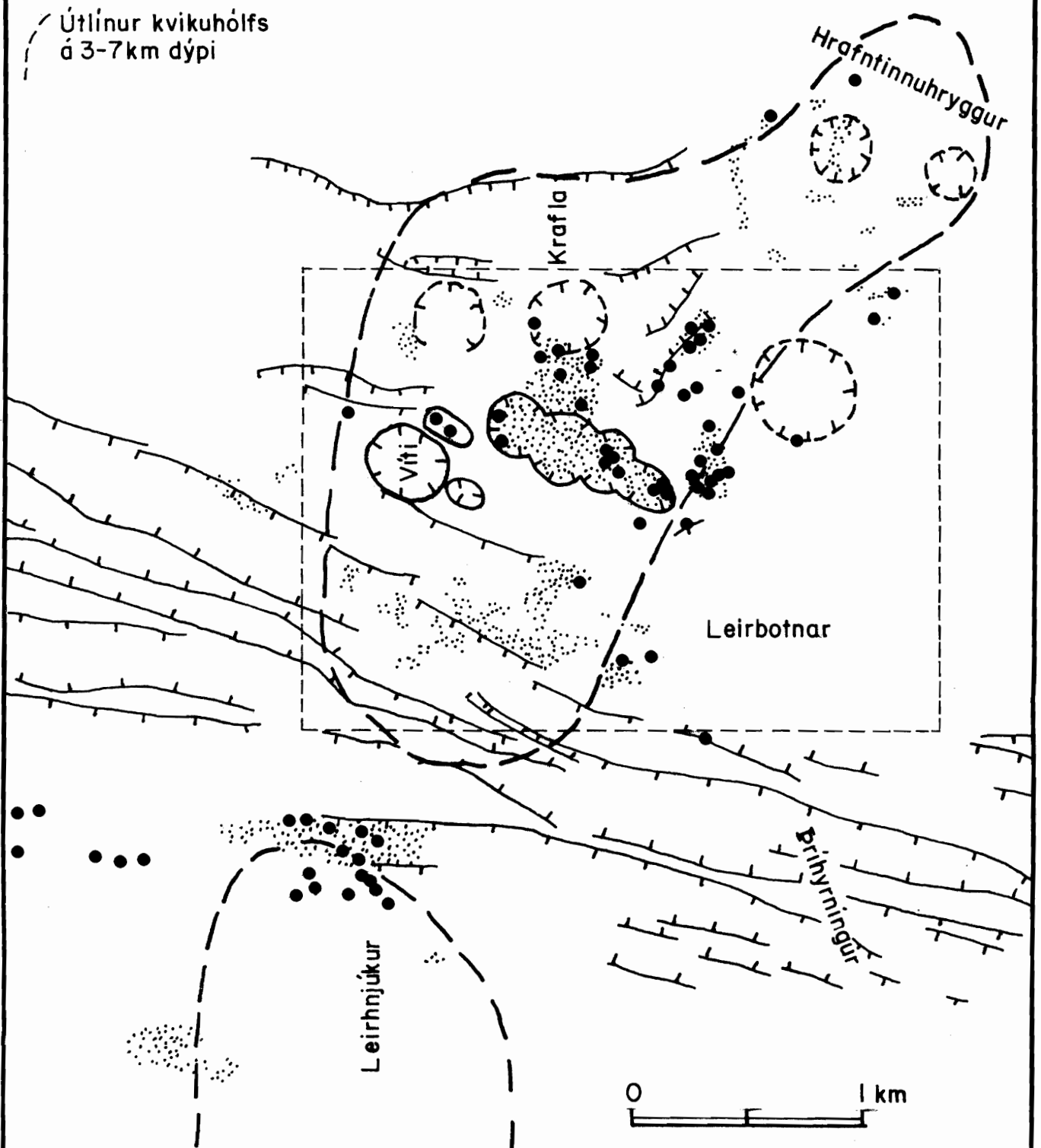
⊗ Sprengigígur

● Gufuauga eða hver








⊙ Ummyndun

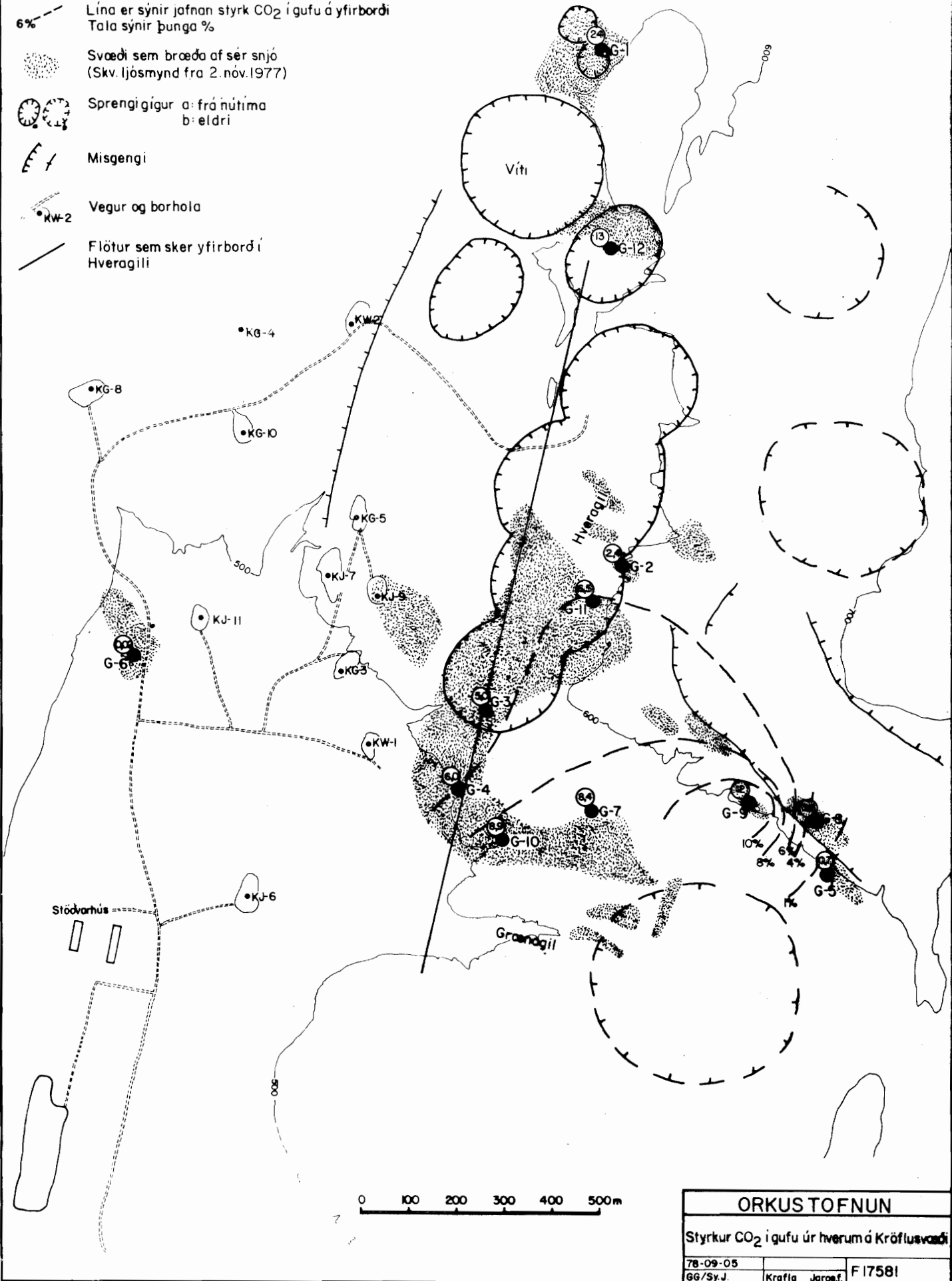
⋯ Útlínur kvikuholfs á 3-7 km dýpi

Mynd 4,1



SKÝRINGAR

-  Sýnatökustaður
(Tala í hring sýnir styrk CO₂ í gufu þunga-%)
-  Lína er sýnir jafnan styrk CO₂ í gufu á yfirborði
Tala sýnir þunga %
-  Svæði sem bræða af sér snjó
(Skv. ljósmynd frá 2. nóv. 1977)
-  Sprengigigur a: frá nútíma
b: eldri
-  Misgengi
-  Vegur og borhola
-  Flötur sem sker yfirborði
Hveragili



ORKUSTOFNUN		
Styrkur CO ₂ í gufu úr hverum á Kröflusvæði		
78-09-05		
GG/Sy.J.	Krafla Jaræf.	F17581

4.2 Hlutföll gastegunda í gufu

Við frumrannsókn á háhitasvæðum hefur athugun á gashlutföllum þótt gefa góða vísbendingu um það, hvar uppstreymi er mest og hvar berghiti er hæstur í viðkomandi jarðhitakerfi. Sú túlkun byggir á því, að jafnvægi ríki milli gastegundar annars vegar og bergs og vatns hins vegar (23). Ekki er unnt að gera ráð fyrir, að jafnvægi ríki nú í neðri hluta jarðhitakerfisins í Kröflu eftir hina miklu aukningu á koldíoxíði, og er því ekki reynt að nota nýjar efnagreiningar til túlkunar á hita og uppstreymi eins og gert hefur verið fyrir á Kröflusvæðinu (23).

Á mynd 4.3 er teiknað upp hlutfallið $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ á móti $\text{CO}_2/(\text{CO}_2+\text{H}_2\text{S}+\text{H}_2)$. Þar sést, að sýni úr báðum hlutum jarðhitakerfisins fyrir umbrotin, er hófust 1975, hafna á svipuðum stað á myndinni. Við umbrotin jókst styrkur koldíoxíðs mjög í neðri hluta, en í efri hlutanum var styrkur gastegunda svipaður og áður. Á myndinni verður nú greinilegur aðskilnaður milli sýna úr efri og neðri hluta. Sýni úr KW-1 fellur hins vegar mitt á milli flokka. Í kafla 2.3 kemur fram, að sýni úr KW-1 falla bæði í myndir af efri hluta og neðri hluta.

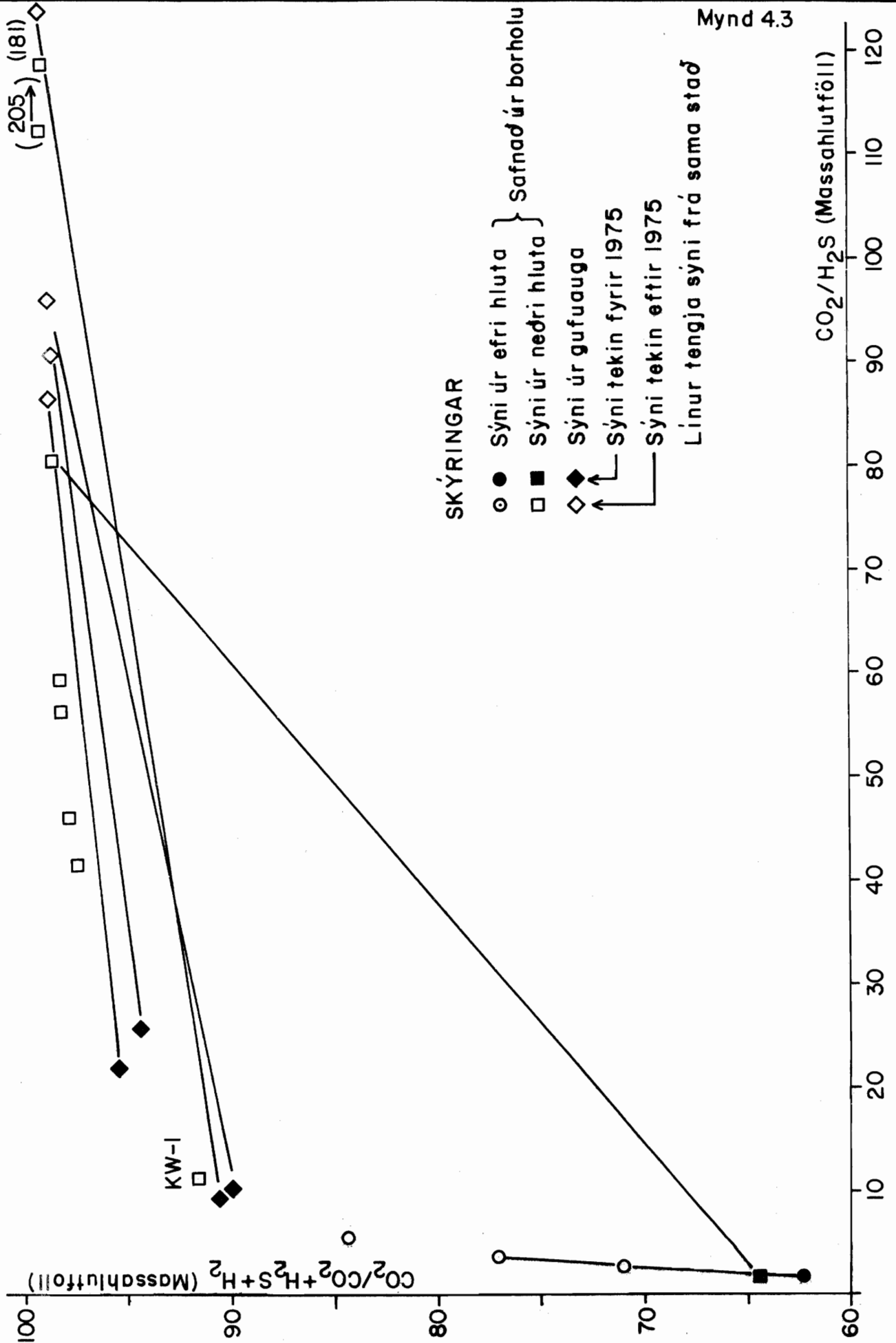
Sýni úr gufuaugum, sem tekin voru 1970, skera sig úr sýnum úr borholum, er safnað var fyrir umbrotin. Þetta getur stafað af því, að við gufuumyndun rýkur koldíoxíð frekar yfir í gufufasa, og af þeim sökum er hlutfallið $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$ í gufunni hærra í þéttivatni en í vatni. Þá getur þétting á gufu ráðið nokkru. Eftir umbrotin breytist efnasamsetning gassins hins vegar þannig, að koldíoxíð eykst verulega og eru því sýni tekin á árinu 1978 sambærileg við sýni úr neðri hluta. Þetta er túlkað þannig, að gufan sem streymir upp í Hveragili og suðurhlíðum Kröflu sé ættuð úr neðri hluta jarðhitakerfisins.

Á mynd 4.4 eru sýnd hlutföll koldíoxíðs, brennisteinsvetnis og vetnis í eldri og yngri sýnum. Sést þar, að sýnin frá 1977-78 leita nú öll utan eitt upp í koldíoxíðtoppinn vegna breytinganna, er verða samfara umbrotunum, er hófust með gosi í Leirhnjúk 1975. Eitt sýni, G-5, hefur samsetningu, sem svipar til samsetningar gass í eldri sýnum frá svipuðum slóðum. Í sýnunum, er Niels Óskarsson hefur safnað í G-4, kemur fram, að ýmist er samsetning gassins svipuð og hún var fyrir gosið ellegar þar mælist aukning í koldíoxíði (17).



Gashlutföll í sýnum úr borholum og gufuaugum við Kröflu

Mynd 4.3



(205) (181)

KW-1

CO₂/CO₂+H₂S+H₂ (Massahlutföll)

CO₂/H₂S (Massahlutföll)



Hlutföll gastegunda í hverum á Kröflusvæði

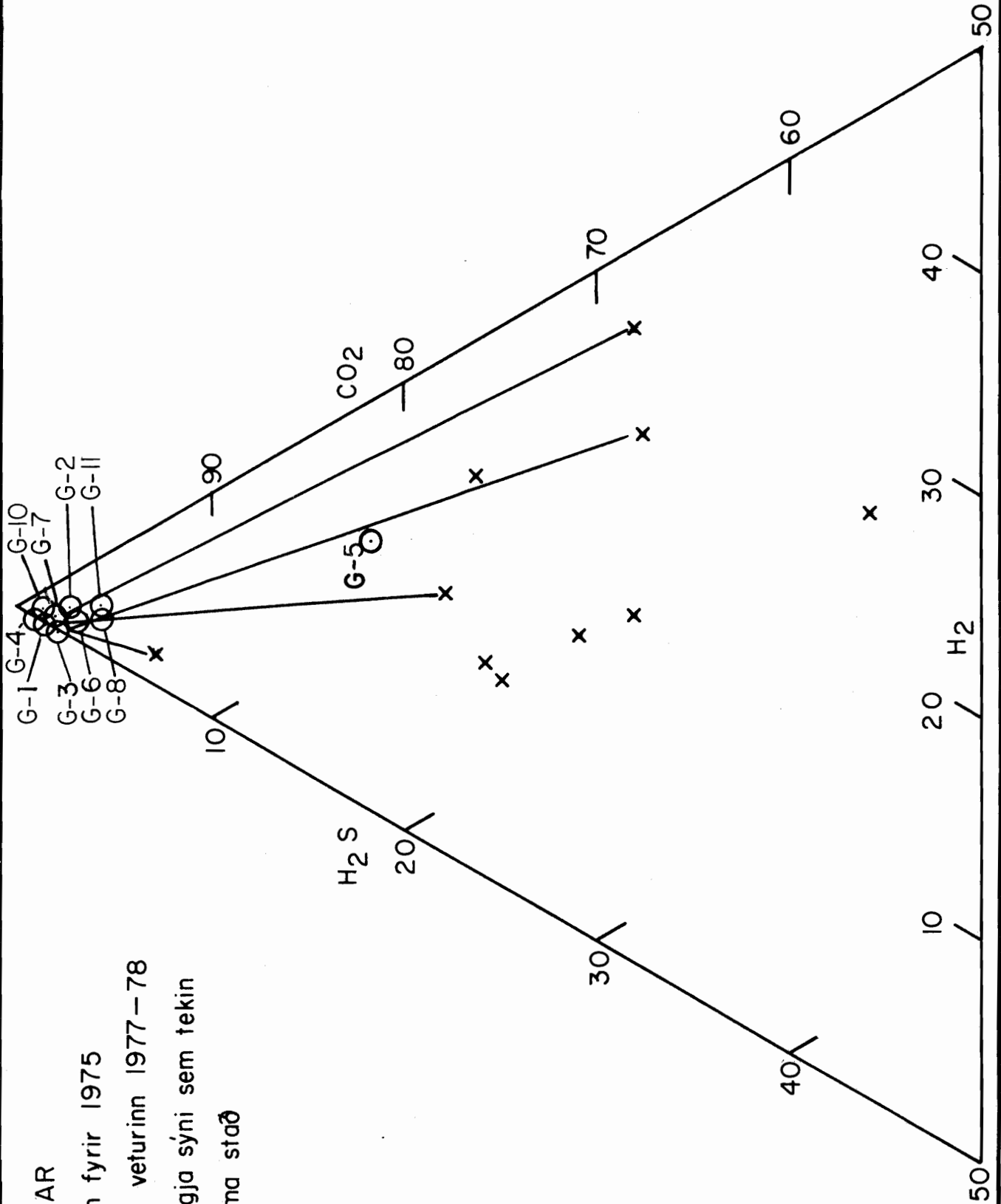
'78.07.27 GG /GG

T 704 T 283

Krafka jarðefnafr.

F 17420

Mynd 4.4



SKÝRINGAR

- x Sýni tekin fyrir 1975
- ⊙ Sýni tekin veturinn 1977-78
- Línur tengja sýni sem tekin eru á sama stað

4.3 Styrkur gastegunda í gufu

Styrkur koldíoxíðs og brennisteinsvetnis í gufu, sem safnað var á Kröflusvæðinu er sýndur á töflu 4.1. Til samanburðar eru sýnd í töflu 4.2 reiknuð gildi á styrk koldíoxíðs í gufu, eftir að vatn úr borholum hefur soðið í 100°C. Með samanburði á þessum tveimur töflum sést, að styrkur koldíoxíðs í gufunni er álíka hár eða hærri en reiknuðu gildin fyrir neðri hlutann utan eitt sýni (G-6), sem líkist helst því lægsta úr efri hluta. Þetta bendir til þess, að öll gufusýnin (nema G-6) séu ættuð úr neðri hlutanum. Þetta er í samræmi við þá túlkun, sem sett var fram um gashlutföll hér að framan.

Við athugun á mynd 4.2 sést, að styrkur koldíoxíðs í gufu er mestur norðan við Víti, en minnkar er sunnar dregur og er í lágmarki um mitt Hveragil en fer þá hækkandi á ný, og nær hámarki í sýnatökustað G-9 í suðurhlíðum Kröflu. Þar skammt fyrir austan hefur styrkur koldíoxíðs minnkað stórum og í G-5 er hann í lágmarki.

Hlutföll og styrkur gastegunda bendir til þess, að skifting jarðhita-kerfisins í tvo hluta, sem er mjög greinileg á þeim stöðum, þar sem borað hefur verið, sé horfinn í Hveragili. Allt bendir til þess, að þar nái gufa úr neðri hluta til yfirborðs.

Þá bendir rannsókn til þess, að styrkur koldíoxíðs sé hæstur nyrst á uppstreymisrásinni. Einnig kemur fram annað hámark í styrk koldíoxíðs í suðurhlíðum Kröflu, en hann minnkar mjög snögglega þar fyrir austan, sem er vísbending í þá átt, að áhrif umbrota séu þar hverfandi.

TAFLA 4.1 Efnasamsetning gufu í hverum og gufuaugum á Kröflusvæði

Sýnatöku- staðir	Sýni nr.	Gassamsetning (Rúmmáls %)					Gasstyrk, í gufu (ppm)	
		CO ₂	H ₂ S	H ₂	O ₂	CH ₄	CO ₂	H ₂ S
G-1	KRAG08781078	98.4	0.7	-	-	-	239600	1490
G-2	KRAG08781075	98.1	1.4	0.3	0	-	24100	397
G-3	KRAG08781072	97.5	1.6	-	0.3	-	50300	702
G-4	KRAG07781071	96.2	1.3	2.1	0.7	-	58100	710
G-5	KRAG07781063	47.7	4.4	7.0	7.6	0.9	6742	1121
G-6	KRAG12771210	31.8	0.4	0.7	14.0	-	1820	54.1
G-7	KRAG07781068	98.5	1.1	0.3	-	-	84000	863
G-8	KRAG07781064	95.7	2.8	1.3	0.2	0.2	39300	977
G-9	KRAG07781066	97.2	1.2	0.4	0.6	-	123200	1280
G-10	KRAG07781069	98.5	1.1	0.3	-	-	89000	804
G-11	KRAG08781074	95.8	2.8	-	0.3	-	64800	1160
G-12	KRAG08781077	97.1	1.8	0.4	0.4	-	125100	1920

TAFLA 4.2 Hlutur koldíoxíðs (CO₂) í gufu eftir suðu í 100°C (ppm)

Efri hluti					Neðri hluti					
KW-2	KG-8	KJ-9	KG-10	KJ-11	KW-1	KJ-6	KJ-7	KJ-9	KG-10	KJ-11
1100	900	2500	7600	300	8600	19300	49000	22400	116000	45000

5. NIÐURSTÖÐUR

Í þessari skýrslu er sýnt, hvernig efnainnihald borholuvökva styður þá tilgátu, að innstreymi í borholur í Kröflu sé úr tveimur geymum með mismunandi eiginleikum. Í öðrum geyminum, efri hluta, er gassnautt 200-230°C heitt vatn, en í hinum, neðri hluta, er gasríkur sjóðandi vökvi, sem sennilega hefur komist í náð samband við kvikuessa eftir atburði þá, er meðal annars leiddu til Leirhnjúksgossins 1975. Sú tilgáta er sett fram, að neðri hluti sé uppstreymisrás í gegnum jarðhitakerfið frá kviku allt til yfirborðs. Þessi uppstreymisrás getur til dæmis verið sprunga sú, er liggur eftir Hveragili. Á yfirborði kemur fram gasríkt gufustreymi nálægt Hveragili en gassnauðara streymi austar og vestar. Einnig eru gasríkar æðar djúpt í holum vestarlega en grynnra er á þær austar á svæðinu. Samkvæmt þessu líkani streymir inn í rásina, á allt að 3 km dýpi, kvikugas og gufa ásamt jarðvatni, sem náð hefur háu hitastigi vegna varmastreymis frá kvikuþrónni. Þessi blanda streymir upp rásina og hvarfast á leiðinni við berg og vatn. Hitastig í rásinni fylgir suðumarksferli vatns. Ætla má, að hlutur kvikuessa í blöndunni sé mestur næst kviku en minnki er fjær dregur. Mest virðist af kvikugösun í KG-10, en magn þeirra í neðri hluta holum fer síðan minnkandi í eftirfarandi röð: KJ-7, KJ-6 og KW-1.

Útfellingar í holum í Kröflu voru mestar í KG-10, KJ-7 og KJ-6 og er sennilegt, að þær séu afleiðing af röskun þeirri er kvikuessar valda á jafnvægjum milli bergs og vatns.

Holur KJ-9 og KJ-11 verða fyrir minni áhrifum af kvikuessum og virðast taka inn hlutafgasaða vatns- og gufublöndu eða upphitað jarðvatn, sem ekki hefur komist í beina snertingu við kvikuessa. Í þessum holum hefur ekki orðið vart járn-kísil útfellinga.

Efri hlutinn er samkvæmt þessu líkani berg það, sem umlykur uppstreymisrásina og hitnar bæði vegna leiðni gegnum bergið og blöndunar við þéttan uppstreymisvökva. Holur, sem draga vatn úr efri hluta nálægt uppstreymisrásinni ættu að hafa hærri hita, meiri gasstyrk og herra H_2/H_2S hlutfall en holur fjær. Það kemur og fram, að holur KW-2, KJ-9 nær Hveragili draga inn gasríkara vatn með herra H_2/H_2S hlutfalli en KG-8 og KJ-11, sem eru fjær. Jafnframt finnst í KW-2, KG-8 og KJ-11 köfnunarefni sem bendir til blöndunar við jarðvatn og snertingar við andrúmsloft.

Það ber að taka fram, áður en lengra er haldið, að borholur á Kröflusvæðinu eru staðsettar á svo litlum, afmörkuðum bletti að varast ber að útvíkka túlkun þessa og nota til mats á jarðhitakerfinu í heild.

Ef þessar niðurstöður eru notaðar til að meta það svæði sem borað hefur verið í (1977) virðist helst um þrjá nýtingarmöguleika á svæðinu að ræða.

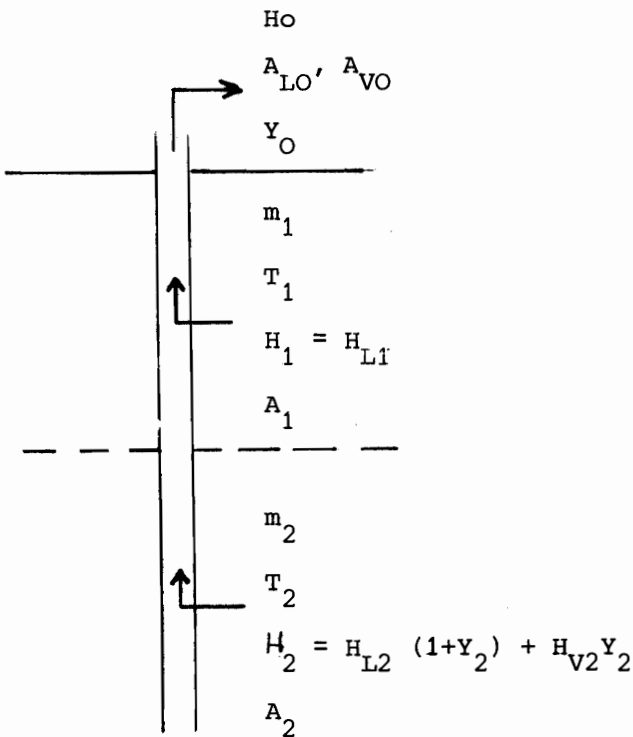
- 1) Vinnsla vatns sem hefur hitnað vegna varmaleiðni án beinnar snertingar við kvikuessa, úr djúpt fóðruðum holum (sbr. KJ-11).
- 2) Vinnsla afrennslisvatns úr uppstreymisrásum á 1000-1200 m dýpi (sbr. KJ-9).
- 3) Vinnsla vatns-gufublöndu beint úr uppstreymisrásinni, á litlu dýpi, þar sem líkur á útfellingum eru litlar (sbr. KW-1).

Heimildir

- 1) Orkustofnun (1977) Holubr ef nr. 7.
- 2) Stefán Arnórsson og Einar Gunnlaugsson (1975). Leiðbeiningar um söfnun vatns- og gass yna (Sk yrsla Orkustofnunar OS JHD 7552).
- 3) Gestur Gíslason og Stefán Arnórsson (1976). Framvindusk yrsla um breytingar   rennsli og efnainnihaldi   borholum 3 og 4   Kröflu (Sk yrsla Orkustofnunar OS JHD 7640).
- 4) Stefán Arnórsson (1973). Uppleyst efni   heitu vatni (Sk yrsla Orkustofnunar OS JHD 7317).
- 5) Truesdell, A.H. (1975). Summary of section III. Geochemical Techniques in Exploration (Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, U.S.A., May 20-29, 1975).
- 6) B.G. Weissberg and M.G.R. Zobel (1973). Geothermal mercury pollution in New Zealand. Bull. Environ. Contam Toxicol. 9, 148-155.
- 7) Jón Ólafsson (1975). Volcanic influence on seawater at Heimaey, Nature, 255, 138-141.
- 8) Jón Ólafsson (1976). Kvikasilfur og arsenik   h hitavatni við Námafjall og Kröflu. - Sk yrsla um frumk nnun. (gerð fyrir OS).
- 9) Jón Ólafsson (1977). Kvikasilfur og arsenik við Námafjall og Kröflu. Sk yrsla um könnun 29.-31.  g st 1977. (gerð fyrir OS).
- 10) Benedikt Steingrímsson og Gestur Gíslason (1978) Krafla. Aflm lingar   borholum (Sk yrsla Orkustofnunar OS JHD 7806).
- 11) Sk yrsla um pr ysti- og hitaástand jarðhitakerfisins   Kröflu. Væntanleg   næstunni hjá OS.
- 12) Trausti Hauksson (1978). Áhrif kold oxi s   hitaeyginleika mettaðrar vatns-gufublöndu (Sk yrsla Orkustofnunar OS JHD 7835).

- 13) Stefán Arnórsson (1978). Framvinduskýrsla um efnafræði útfellinga í borholum í Kröflu (Skýrsla Orkustofnunar OS JHD 7832).
- 14) Einar Gunnlaugsson (1977). The Origin and Distribution of Sulphur in Fresh and Geothermally Altered Rocks in Iceland. Ph.D. thesis, Department of Earth Sciences, University of Leeds. October 1977.
- 15) Hrefna Kristmannsdóttir, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Einar Gunnlaugsson (1976). Borholur 3, 4 og 5 í Kröflu. Borun, vatnsæðar, niðurstöður berggreininga (Skýrsla Orkustofnunar OS JHD 7641).
- 16) Guðmundur E. Sigvaldason og Gunnlaugur Elísson (1968). Collection and analysis of volcanic gases at Surtsey, Iceland (Geochim. et Cosmochim. Acta, vol. 32, pp. 797-805).
- 17) Niels Óskarsson (1978). Effect of Magnetic Activity on Fumarole Gas Composition in the Námafjall-Krafla Volcanic Center, N-Iceland (Norræna eldfjallastöðin 7803).
- 18) Kristján Sæmundsson. Jarðfræðikort Fnr. 14623.
- 19) Páll Einarsson (1978). S-wave shadows in the Krafla caldera in NE-Iceland, evidence for a magma chamber in the crust (Skýrsla Raunvísindastofnunar Háskólans RH-78-9).
- 20) Christensen, O.T. (1889). Tidsskrift for Physik og Chemik 10. p. 225, 1889.
- 21) Thorkelsson, Thorkell (1916). The hot spring of Iceland, København 1910.
- 22) Jarðboranir ríkisins (1951). Efnagreiningar á hverum og laugum.
- 23) Kristján Sæmundsson o.fl. Námafjall-Krafla. Áfangaskýrsla um rannsókn jarðhitasvæða. (Skýrsla Orkustofnunar júní 1971).

Viðauki 1. Reikningsaðferðir



Mynd V.1

Mynd V.1 sýnir borholu er dregur vatn úr efri hluta og vatns- gufu- blöndu úr neðri hluta jarðhitakerfis- ins í Kröflu.

Massavægi fyrir holuna má skrifa þannig: $1 = m_1 + m_2$ 3.10

Efnajafnvægi fyrir holuna fyrir hin ýmsu efnasambönd, rokgjörn og órok- gjörn skrifast gjarnan sem:

$$A_o = A_1 m_1 + A_2 m_2 \quad 3.11$$

Fyrir vatnsgufublöndu við holutopp gildir: $A_o = A_{LO} (1-Y_o) + A_{VO} Y_o$ 3.12a

og í neðri hluta:

$$A_2 = A_{L2} (1-Y_2) + A_{V2} Y_2 \quad 3.12b$$

Fyrir órokgjörn efni eins og kísil má skrifa jöfnur 3.11, 3.12a og 3.12b sem:

$$[SiO_2]_{LO} (1-Y_o) = [SiO_2]_1 m_1 + [SiO_2]_2 m_2 (1-Y_2) \quad 3.13$$

Við þekkjum uppleysanleika kvars sem fall af hita:

$$[SiO_2]_1 = \psi(T_1) \text{ og } [SiO_2]_2 = \psi(T_2) \quad 3.14$$

Varmavægi holunnar skrifast:

$$H_o = m_1 H_1 + m_2 H_2 \quad 3.15$$

Þar sem:

$$H_1 = H_{L1} \text{ og } H_2 = H_{L2} (1-Y_2) + H_{V2} Y_2 \quad 3.16$$

Ef gasmagn er mikið verður að taka með í reikninginn áhrif þess á suðuhita. Þar sem koldíoxíð (CO_2) hefur mælst hátt í rennsli hola í Kröflu er tekið tillit til áhrifa þess á heildarþrýsting en áhrifum annarra gastegunda sleppt. Við höfum:

$$P = P_s + P_c \quad 3.20$$

$$A_{L2} = \alpha(T) P_c \quad 3.21$$

$$\alpha(T) = 5.4 + 3.4 (T/100) - 1.2 \frac{T^2}{100^2} \quad 3.22$$

$$A_{V2} = P_c/P = \frac{A_{L2}}{\alpha(T)P_s + A_{L2}} \quad 3.23$$

Ef jafna 3.23 er sett inn í 3.12 fæst eftirfarandi annarrar gráðu jafna:

$$A_{L2}^2 + \alpha(T)P_s + \frac{Y_2 - A_2}{1 - Y_2} A_{L2} + \frac{\alpha(T)P_s}{1 - Y_2} A_2 = 0 \quad 3.24$$

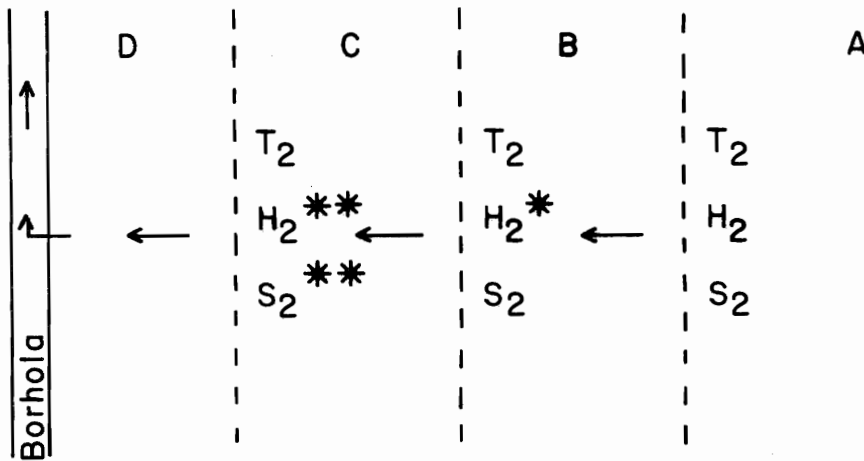
Ef þessi jafna er leyst fæst styrkur CO_2 í vatnsfasa. Innsettur í 3.21 gefur hann hlutþrýsting CO_2 og í jöfnu 3.23 CO_2 í gufufasa.



Aðstreymi að borholu er vinnur vatns-gufublöndu úr „sjóðandi“ bergi

Mynd V.2

Innroen suda ← Jafnheit suda ← Ótruflað ástand



← Jafnvægi við kvarts

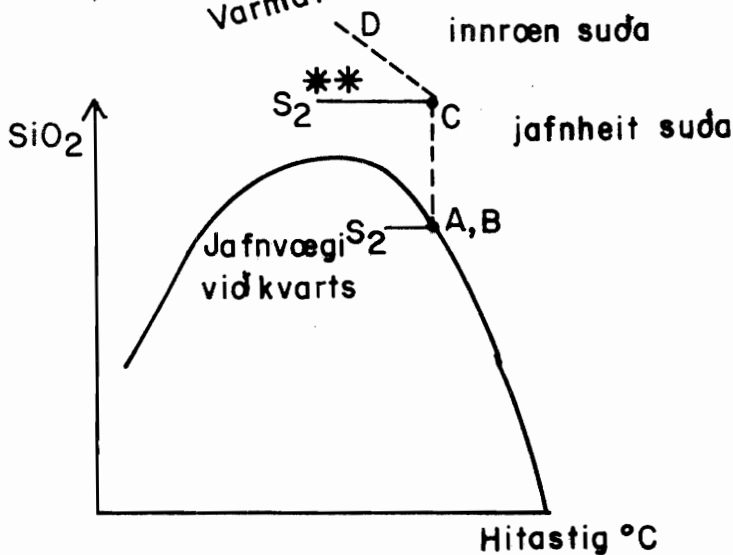
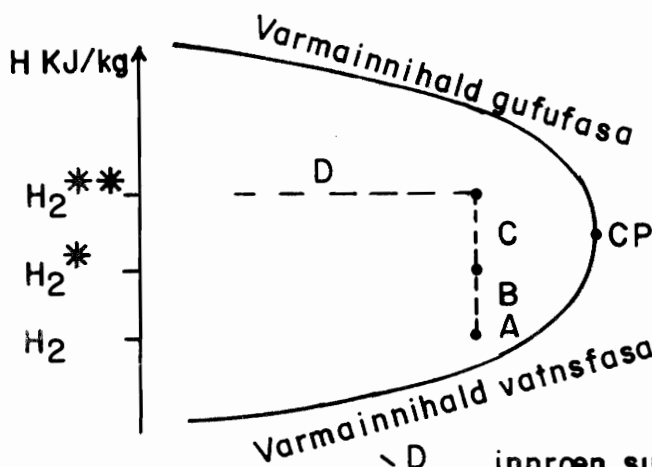
T_2 : Hitastig

H_2 : Varmainnihald

S_2 : SiO_2 (ppm) í vatnslausn

* Kvartsjafnvægisbord

** Innroent suðubord



Tákn

- A: styrkur efnasambands [kg/kg].
- T: hitastig [°C].
- P: heildarþrýstingur [bar].
- m: massahlutfall af heildarrennsli.
- Y: gufuhlutfall.
- H: varmainnihald [kJ/kg].
- K: dreifistuðull milli vatns og gufu.
- P_S: hlutþrýstingur gufu [bar]
- P_C: hlutþrýstingur CO₂.
- o: stærð ákvörðuð við holutopp.
- 1: ástand efri hluta.
- 2: ástand neðri hluta.
- L: vatnshluti (Liquid).
- V: gufuhluti (Vapour).

Viðauki 2. Áhrif þrýstifalls í nágrenni holu á niðurstöður reikninga.

Í kafla 3.3 er lýst niðurstöðum reikninga á varmainnihaldi neðri hluta jarðhitasvæðisins í Kröflu. Þeir reikningar gera ráð fyrir jafnvægi við kvarts og innrænni (adiabatiskri) suðu frá jafnvægisborði og í holu-topp. Ef við hugsum okkur, að aðstreymi að holu gerist í "þrepum" eins og sýnt er á mynd V.2 er þetta það sama og að segja, að varmainnihald við innrænt suðuborð H_2^{**} sé það sama og varmainnihald við kvarts jafnvægisborð H_2^* . Á mynd V.2 sjáum við að reiknað varmainnihald H_2^* er ekki það sama og varmainnihald í ótrufluðum jarðhitageymum þó svo að þessi forsenda sé rétt.

Til að fá fram varmainnihald ótruflaðs ástands, þarf suða að vera innræn frá ótrufluðu suðuborði. Slíkar aðstæður eru vart hugsanlegar nema við upphleypingu þ.e. þegar vökvinn streymir stutta vegalengd í bergi í átt að holu.

Á hinn bóginn veldur það rangri ákyörðun á hita og varmainnihaldi, ef forsendur reikninga eru ekki réttar þ.e. $H_2^{**} \neq H_2^*$ (sjá mynd V.2). Ef $H_2^{**} > H_2^*$, er uppleystur kísill í vatni úr neðri æðum meiri en svarar til jafnvægis við kvarts við gefið hitastig. Þetta veldur því að gufuhiti Y_2 , sem fenginn er úr jöfnuknippi 3.18 í viðauka 1 reiknast of lágur. Varmainnihald innstreymis úr neðri æðum reiknast of hár. Ef $H_2^{**} < H_2^*$ fæst aftur á móti of hátt gildi fyrir varmainnihald en of lágt gildi fyrir rennsli úr neðri æðum. Frekar er talið ólíklegt að slíkt geti átt sér stað og að kísill falli út við innræna suðu.

Nú vildum við gjarnan geta notað niðurstöður reikninga þeirra, sem lýst er í kafla 3.3 til að skera úr um það, hvort í ótrufluðu ástandi sé vatn, vatns-gufublanda eða gufa í jarðhitageyminum. Eins og að framan er lýst, eru litlar líkur til, að reiknað varmainnihald innstreymis sé það sama og í ótrufluðum geyminum, jafnvel þótt forsendur reikninga séu réttar. Ef niðurstöður gefa, að inn í holuna streymi vatns-gufublanda er því ekki gefið að í ótrufluðum geyminum sé vatns-gufublanda. Slíkt innstreymi má t.d. skýra með því að vatn í nágrenni holunnar sjóði og vatns-gufublandan streymi jafnheit (isotermiskt) að holunni og jafnvægi náist jafnharðan við

kvarts. Einnig gæti vatn, sem myndast við suðu í bergi skilist frá að hluta og valdið háu varmainnihaldi innstreymis. Slíkar niðurstöður er þó engan veginn hægt að skýra nema að innstreymi úr berginu sé annaðhvort vatn og gufa úr ótrufluðum geyminum eða að það eigi sér stað suða í berginu eftir að borhola byrjar að blása.