

FRAMVINDUSKÝRSLA UM EFNAFRÆÐI ÚTFELLINGA Í BORHOLUM VIÐ KRÖFLU

STEFÁN ARNÓRSSON

FRAMVINDUSKÝRSLA UM EFNAFRÆÐI ÚTFELLINGA Í BORHOLUM VIÐ KRÖFLU

STEFÁN ARNÓRSSON

O. HELSTU NIÐURSTÖÐUR

Þrennskona útfellinga hefur orðið vart í borholum við Kröflu. Það eru kalkútfellingar, sem bundnar eru við efra kerfið og útfellingar tveggja kísilsteinda og nokkurra járnefnasambanda, sem tengdar eru við neðra kerfi. Þessar útfellingar eru það örur, að þær stífla sumar borholur á tiltölulega skömmum tíma og valda þannig alvarlegum erfiðleikum við rekstur þeirra.

Tvær leiðir eru taldar koma til greina til að sneiða hjá kalkútfellingum. Annars vegar að fódra efra kerfið af. Hins vegar að finna borstað þar sem berghiti fylgdi suðumarksferli í efstu 1000 metrunum eða þar um bil. Til að fódra efra kerfið af þarf um 1100 metra fódningu. Fylgdi berghiti suðumarksferli dygði grynri fódning (500 - 600m?).

Við suðu á jarðhitavatni verður ætíð útfelling á járn-efnasamböndum, einu eða fleirum. Styrkur járns er mjög lágur í ósöltu jarðhitavatni, sem er kaldara en um 250°C, eða af stærðargráðunni 0,01ppm. Veldur það því, að lítið magn útfellinga myndast við suðu á slíku vatni. Tilraunir gefa til kynna, að styrkur járns í jarðhitavatni fari mjög vaxandi með hitastigi, þegar það fer upp fyrir 300 - 350°C. Þó virðist erfitt að skýra þann háa járnstyrk, sem mælt hefur í borholuvatni í Kröflu, nema jarðhitavökvinn hafi náð um 400°C hita eða hærri. Því eru taldar nokkrar líkur á því, að hinar öru járnútfellingar stafi af eldsumbrotum.

Í blásandi borholum, sem taka vökva úr neðra kerfinu, eru þær aðstæður fyrir hendi, sem valda kísilútfellingum. Talið er að járníð í vatninu örfi kísilútfellingar. Hraði járn og kísilútfellinganna virðist vera meiri í þeim holum, sem hafa tilhneigingu til þess að byggja upp háan þrýsting í blæstri. Draga mátti úr járn og kísilútfellingum með því að hafa holur grynri en um 1500m.

Árangur af slíkum holum byggist á því, að vatn fáist úr neðra kerfinu ofan 1500m.

Bráðabirgðaniðurstöðurnar um kísil- og járnútfellingar skyldu hafðar í huga við ákvörðun á staðsetningu og dýpi borhola. Prófanir á holunum munu skera úr um árangur af því að bora grynri holur (1500m) í stað dýpri (yfir 2000m).

I. INNGANGUR

Þegar unnið var að hreinsun á borholum í Kröflu sumarið 1977 voru tekin sýni af útfellingunum. Við athugun á þeim kom í ljós, að um 3 hópa efna eða steinda var að ræða. Þeir eru kalk, kísilefnasambönd, og ýmis efna-sambönd af járni. Þá hefur einnig orðið vart útfellinga af anhydríti í einni holu. Í þessari framvinduskýrslu verða útfellingunum gerð nokkur skil að því er varðar efnaorkufræðilega úrvinnslu. Hún felur í sér úttekt á þeim ytri (hiti, þrýstingur) og innri aðstæðum (efnasamsetning), sem ráða því, hvort útfellingar geta orðið eða ekki. Hún byggist á þekktu efnainnihaldi borholuvökvans og þekktum uppleysanleika þeirra steinda eða efnasambanda, sem greindar hafa verið í útfellingunum. Ekki er reynt að meta hraða útfellinga nema í kvalítatífum skilningi. Úrvinnsla, sem tekur til kalkútfellinga og útfellinga ýmissa járnefnasambanda, felur í sér umfangsmikla reikninga á efnasamböndum í vatninu og breytingum samfara suðu. Reikningsaðferðir liggja fyrir að því er varðar kalkútfellingar, en ekki hvað varðar útfellingar járnefnasambanda. Stefnt er að því, að þeim reikningum verði lokið í júní - júlí, 1978. Reikningum af þessu tagi eru gerð nokkur skil af Truesdell og Singers (1974), Arnórsson o.fl. (1978) og Arnórsson (1978).

Aðstæðum, sem ráða kísilútfellingum úr jarðhitavatni, hafa verið gerð fullnægjandi skil (sjá t.d. Arnórsson, og Sigurðsson, 1974). Nokkur óvissa hefur þó verið til staðar, ef hitastig í jarðhitageymi er ofan við 300°C, vegna óvissu á uppleysanleika kísilsteindarinnar kvars, sem ræður styrk uppleysts kísils í ósoðnu jarðhitavatni. Nú eru í gangi tilraunir með uppleysanleika kvars ofan við 300°C, sem Robert Fournier hjá U.S.G.S. vinnur að og standa vonir til, að niðurstöður liggi fyrir nálægt miðju ári, 1978.

2. KALKÚTFELLINGAR

Djúpvatn á jarðhitasvæðum er jafnan mettað af kalki (CaCO_3). Þegar þetta vatn sýður, eiga sér stað ýmsar breytingar á efnasamsetningu vatnsins og eru þær alltaf á þá leið, að vatnið verður yfirmettað af kalki. Yfirmettun verður ætíð mest í upphafi suðu og því meiri sem vatnið er saltara og með lægra hitastig. Ekki þykir ástæða til að gera þessum breytingum nánari skil hér, heldur vísast til greinar eftir Stefán Arnórsson (1978).

Á mynd 1 er sýnt hvernig vatnið í holum KW-2 og KG-8 yfirmettast af kalki samfara suðu. Þykka línan sýnir kalkmettun, en þær grönnu kalkmettunarástánd vatnsins, sem sýður. Lárétti ásinn sýnir hitastig vatnsins, sem sýður. Miðað er við innræna suðu í lokuðu kerfi. Upphafspunktur grönnu línanna samsvarar hitastigi á ósoðnu djúpvatni. Lega þessara punkta gefa til kynna nokkra yfirmettun. Hér er þó ekki um marktækt frávik frá mettunarferli að ræða.

Kalkútfellingar í borholum við Kröflu eru að mestu bundnar við efra kerfið svokallaða, þ.e. vatnsæðar, sem eru 210-220°C heitar. Holur KW-2 og KG-8, sem fjallað var um hér að ofan, taka eingöngu vatn úr efra kerfi og gefa þær marktæka mynd af því ástandi, sem almennt gildir um borholur, sem eingöngu taka vatn úr efra kerfinu. Ef hola KW-2 er undanskilin fer vatnið úr efra kerfis æðunum ekki að sjóða, fyrr en í borholunum, a.m.k. við núverandi þrýstingsástand í jarðhitageyminum.

Í borholum G-2 og G-4 í Hveragerði og í djúpu holunum við Svartsengi hafa átt sér stað kalkútfellingar. Myndast þær það ört að hreinsa þarf holurnar um það bil einu sinni á ári í Hveragerði og ef til vill oftár í Svartsengi. Samkvæmt mælingum hefst suða í fódurröri, á um 100m dýpi í Hveragerði og í um 400m dýpi í Svartsengi. Aðstæður til kalkútfellinga eru því hliðstæðar í efra kerfis holum

í Kröflu og í holum í Hveragerði og djúpu holunum við Svartsengi.

Eins og áður var nefnt, verður kalkýfirmettun mest - og þar með útfellingar mestar - þar sem suðan hefst. Reynslan hefur sýnt, að kalkútfellingar hafa eingöngu skapað vandamál, þegar suða hefst ekki fyrr en í borholum. Slíkar útfellingar hafa ekki reynst vandamál, þegar suðan leitar út í bergið eins og reynslan í Námafjalli sýnir til dæmis. Þetta má skýra með því, að þverskurðarflatarmál borholu er tiltölulega lítið miðað við þverskurðarflatarmál holrýmis í berginu þar sem suða hefst, jafnvel þótt hún hefjist aðeins fáa tugi metra frá holunni. Útfellingar í borholu valda stíflun tiltölulega fljótt en útfellingarnar, sem verða í berginu í nokkurri fjarlægð frá holunni, eru lengur að fylla allt holrýmið nægilega til að stöðva aðrennsli.

Kalkútfellingar voru nokkrar í borholum á jarðhitasvæðinu við Wairakei á Nýja Sjálandi í upphafi nýtingar, en síðan dró úr þeim og þær hörfu að mestu (Ellis pers. uppl.) Þetta stafar líklegast af því, að samfara nýtingunni hefur orðið þrýstifall í jarðhitageyminum og suðan þar með færst út í bergið og jafnframt kalkútfellingar.

Búast má við, að árangur af því að losna við kalkútfellingar með því að suðan færist út í bergið, sé fyrst og fremst háður kalsíum innihaldi vatnsins. Hátt kalsíum innihald hefur það í för með sér, að útfelling getur orðið tiltölulega meiri að magni til og að hún sé ekki eins bundin upphafi suðu heldur nái yfir stærra bil þrýstifalls. Kalsíum innihald í efra kerfis vatni í Kröflu er hliðstætt því, sem er í borholum í Námafjalli. Miðað við reynslu í Námafjalli mætti því búast við, að vandamál kalkútfellinga í efra kerfi í Kröflu minnkaði eða hyrfi, ef suðan færðist út í bergið.

Þær sérstöku aðstæður ríkja í sumum holunum við Kröflu, að efra kerfis vatn blandast gufu og vatni úr dýpri æðum. Þúast mætti við, að gufublöndunin leiddi til afgösunar á efra kerfis vatninu og væri hún því meiri sem gasinnihald gufunnar væri lægra. Afgösunin veldur kalkútfellingum, án þess að suða verði, og við suðu verður meiri útfelling en ella. Ekki er samt hægt að sjá að kalkútfellingar séu meiri í þeim holum sem taka vökva úr báðum kerfunum miðað við þær sem taka eingöngu vatn úr því efra.

3. KALKMETTUNARÁSTAND OFAN 270-290°C OG STYRKUR KOLSÝRU Í JARÐHITAVATNI

Jarðhitavatn, sem er meira en 270-290°C nær ekki að verða kalkmettað. Kalkútfellingar verða því ekki ofan þessara hitastigsmarka. Að svona heitt vatn nær ekki að verða kalkmettað, ræðst af uppleysanleika kolsýru í vatni, þrýstingi í jarðhitageyminum og efnajafnvægjum við steindir í berginu, sem valda því, að hlutfallið $(Ca^{+2})/(H^+)^2$ er konstant fyrir ákveðið hitastig (mynd 2) og breytist log hlutfallsins línulega með $1/T^{\circ}K$. Fyrir vatn, sem er kalkmettað gildir:

$$(Ca^{+2})(CO_3^{-2}) = K_{CaCO_3}$$

Þar sem eftirfarandi jöfnur gilda fyrir fyrsta og annan kleyfnistuðul kolsýru

$$\frac{(H^+)(HCO_3^-)}{(H_2CO_3^{\circ})} = K_{H_2CO_3^{\circ}}$$

$$\frac{(H^+)(CO_3^{-2})}{(HCO_3^-)} = K_{HCO_3^-}$$

má sýna fram á, að styrkur óbundinnar kolsýru (hér táknuð sem $H_2CO_3^{\circ}$ fremur en CO_2) í jarðhitavatni ákveðst eingöngu af hitastigi (hitastigsháðum efnajafnvægisstuðlum) eða:

$$(\text{H}_2\text{CO}_3^0) = \frac{K_{\text{CaCO}_3}}{K_{\text{H}_2\text{CO}_3^0} K_{\text{HCO}_3^-} K_{\text{iCa}}^2}$$

Þar sem $\text{Ca}^{+2}/\text{H}^+ = K_{\text{i}}$

Á mynd 3 er dregin ferill, sem sýnir útreiknaða óbundna kolsýru í jarðhitavatni og til samanburðar útreiknuð kolsýra út frá efnagreiningum fyrir efra kerfis holur í Kröflu og holur frá nokkrum öðrum jarðhitasvæðum. Samræmið, sem er mjög gott, fyrir holur þar sem suða verður ekki út í berginu, sýnir, að kolsýra í vatninu ákveðst af kalkmettun og janvægi við steindir, sem ákveður hlutfallið milli Ca^{+2} og H^+ . Þar sem suða verður úti í berginu, er kolsýrugildið tiltölulega lágt. Það stafar af gufutapi (og afgösun) úti í berginu eða gufuaukningu í holurennslinu. Er það í samræmi við, að vatnið í þessum holum er yfirmettað að kalki.

Við 270–290^o samsvarar styrkur kolsýru í vatni fyrir nefnd steindajafnvægi því, sem getur leyst upp í vatninu við það þrýstingsástand, sem vænta má í jarðhitakerfum. (mynd 3). Við herra hitastig getur nægileg kolsýra naumast leyst upp í vatninu til að viðhalda nefndum steindajafnvægjum. Leiðir það til þess, að vatnið verður kalkundirmettað. Uppleysanleiki kolsýru í vatni er háður þrýstingi. Við hvaða hitastig undirmettum verður, ákveðst af sambandi hitastigs og þrýstings í jarðhitageyminum. Ferlarnir fyrir uppleysanleika kolsýru á mynd 3 samsvara því, að hlutþrýstingur kolsýru sé 20, 50, og 100 loftþyngdir (atm)

Þegar kalkundirmettað vatn, sem er yfir 270–290^o, sýður og kólnar, geta kalkútfellingar átt sér stað, eftir að hitastigið hefur farið eitthvað niður fyrir 270–290^o. Það er komið undir kolsýruinnihaldi djúpvatnsins hvort og þá við hvaða hitastig hiðsoðna vatn nær kalkmettun. Líkur á útfellingum eru meiri, þegar kolsýruinnihaldið er

hærra. Reikningum, sem lúta að þessu vandamáli, hefur ekki enn verið lokið.

Þegar styrkur kolsýru ræðst ekki lengur af efna-
jafnvægjum við steindir í berginu eins og verður ofan
við 270-290°C, er það eingöngu flutningur kolsýru inn
í jarðhitageyminn, sem ræður styrk þessa efnis í jarð-
hitavökvanum. Við eldsumbrotin, sem hófust 1975, varð
mikil aukning á kolsýru í annari djúpu holunni (KG-3), en
ekki í grynri holunum (KW-1 og KW-2). Tölulegar upp-
lýsingar liggja ekki fyrir um hina djúpu holuna (KG-4)
sem þá hafði verið boruð, þótt lækkun á pH-gildi bendi
til gasaukningar. Aukningin er talin stafa af því, að
kolsýra hefur streymt frá kvikuinnskotum inn í jarð-
hitageyminn. Að ekki hafi komið fram aukning í grunnu
holunum, bendir til þess að hitastig í vatnsæðunum,
sem inn í þær streymir sé neðan við 270 - 290°C. Er
þetta í samræmi við hitamælingar í holu KW-2. Samræmd
túlkun hitamælinga og efnagreininga á holu KW-1 eru
flóknari. Botnhiti er um 300°C og eitthvert innstreymi
þar og á 700m dýpi. Kísilhiti holurennslisins í upphafi,
var rúmlega 250°C. Óvissa er á þeim hitastigsmörkum
(270-290°C), sem jarðhitavatn undirmettast við af kalki.
Hér er hallast að þeirri skýringu, að hitastig vatnsæða,
sem gefa vatn og gufu í holu KW-1 hafi ekki verið ofan
nefndra hitastigsmarka og því hafi ekki orðið aukning á
kolsýru í holunni.

Aukning kolsýru í neðra kerfi hlýtur að hafa haft í för
með sér aukið kolsýrustreymi upp í efra kerfið. Þetta
aukna streymi hefur valdið því, að magn kalkútfellinga
í jarðhitageyminum neðan 270-290°C hefur aukist. Erfitt
er að spá í kversu mikil aukning hefur orðið á kalkmyndun.
Það mun fyrst og främst háð því, hverstu stór hluti kol-
sýrunnar hefur streymt með gufu til yfirborðs. Miðað
við 3% styrk kolsýru í neðra kerfis vökva gæti þessi
útfelling numið í mesta lagi 68 grömmum úr hverju kíló
af vatni. Miðað við 100 kg/sek rennsli samsvaraði þessi
útfelling 2.14×10^5 tonnum af kalki á ári eða um 10^5
rúmmetrum. Nægði þetta útfellingarmagn til að þetta

með öllu bergmassa með 10% poruhluta, sem er 100 metra á hvern veg. Gert er ráð fyrir, að streymi sé aðallega um sprungur og verður að teljast líklegt, að þær séu að rúmmáli til mun minna en 10% af berginu. Þó svo að ofangreindar tölur um útfellingarmagn úr hverju kíló af jarðhitavökva séu eitthvað og háar er ályktað, að eldsumbrotin á Kröflusvæðinu hafi með auknum kalkútfellingum valdið einhverri þéttingu í jarðhitasvæðinu ofan u.þ.b. 1000 metra eða þar sem hitastig er neðan við 270°C .

Þrýstimælingar í borholum og gasinnihald í efra kerfis æðum benda til þess, að efra kerfið svonefnda sé afrennsli soðins vatns frá uppstreymistappa. Þétting vegna aukinna kalkútfellinga í slíkum uppstreymistappa, samfara eldsumbrotunum, gæti hafa aukið þrýstifall í uppstreyminu og kært þannig efra kerfið.

4. KÍSILÚTFELLINGAR

Styrkur kísils í djúpvatni á háhitasvæðum ákveðst af uppleysanleika kvars. Uppleysanleiki kvars fer vaxandi í um 320°C , en minnkar aftur ofan þess hitastigs og lækkar snögglega, þegar nálgast krítíska punktinn (mynd 4). Við kælingu eins og verður við suðu, er útfelling kvars til að viðhalda jafnvægi afskaplega treg. Reynslan til þessa hefur sýnt, að kvarsútfellingar eru hverfandi eða engar í borholum og að ekki er hætt á útfellingum kísils, fyrr en vatnið hefur kólnað nægilega til þess að verða mettað áf kísilsteindinni ópal. Á mynd 4 er uppleysanleiki ópals við mismunandi hitastig sýndur.

Við suðu hækkar sýrustig (pH) vatnsins. Nái það að fara upp fyrir um 9 pH einingar klofnar hluti uppleysta kísilsins og myndar H_3SiO_4^- og uppleystur kísill á forminu $\text{H}_4\text{SiO}_4^{\circ}$ minnkar að sama skapi. Það er eingöngu $\text{H}_4\text{SiO}_4^{\circ}$, sem tekur þátt í jafnvægi við kísilsteindir (kvars, ópal, o.fl.), en ekki H_3SiO_4^- . Hækkun sýrustigs upp fyrir pH um það bil 9 veldur þess vegna lækkun á því hitastigi, sem ópalmettun yrði öðrum kosti við. Sýrustig á vatni, sem er jafnkolsýru-ríkt og raunin er með neðra kerfið í Kröflu hækkar ekki meira en svo við suðu, að það leiði til marktækrar myndunar á klotnum kísil (H_3SiO_4^-).

Þegar suða verður, eykst styrkur kísils í vatninu vegna gufumyndunarinnar. Slitróttu línurnar á mynd 4 sýna þessa aukningu fyrir suðu í lokuðu kerfi á 220° , 280° og 340°C heitu djúpvatni, sem var í jafnvægi við kvars. Skurðpunktur þessara lína við ferla ópalmettunar og kristóbálítmettunar, sýna við hvaða hitastig vatnið mettast af þessum steindum. (Kristóbálít er ein hinna svokölluðu kísilsteinda. Er það algengasta kísilútfellingin í borholum við Kröflu.)

Hin tiltölulega háa varmaorka vökva í djúpu borholunum í Kröflu bendir til þess, að hlutfall gufu er hærra en svo, að hún geti hafa myndast við suðu í lokuðu kerfi á vatni með ákveðnu hitastigi, sem er í jafnvægi við kvars. „Auka“ gufan hefur áhrif á frekari gufumyndun við suðu vatnsins samfara þrýstifalli við streymi upp holuna. Á mynd 5 er sýnt samband ópalútfellingamarka við innstreymishita (eða öllu kvarshita) miðað við, að aukagufa sé 0, 0.4, 0.6 og 0.8 af heildarrennsli holu.

Kísilútfellingar hafa átt sér stað í borholum í Kröflu neðan efra kerfis. Hins vegar hefur ópal ekki verið greint með vissu, en það er ókristallað afbrigði kísilsteinda (SiO_2). Þær kísilsteindir, sem fundist hafa eru kristóbalít og kvars (sjá skýrslu OS JHD 7820). Kristóbalít er heldur torleystara en ópal, sbr. mynd 4. Kristóbalít er þekkt á litlu dýpi í sumum jarðhitasvæðum eins og Broadlands á Nýja Sjálandi og Yellowstone Park í Wyoming. Talið hefur verið, að þetta kristóbalít hafi orðið til við umkristöllum á ópalútfellingum. Vera má, að svo sé einnig um kristóbalít og kvars útfellingarnar í borholunum við Kröflu. Ekki er þó hægt að ganga út frá því sem vísu. Hið háa hitastig ($220\text{--}280^\circ\text{C}$) í blásandi borholum neðan efra kerfis auðveldar kristöllum, þ.e. útfellingu á kristóbalíti og kvarsí úr yfirmettaðri lausn. Talið er að járn í lausn geti haft hvetjandi áhrif á kísilútfellingar (Ellis, pers.uppl.). Í samræmi við það mætti búast við að tiltölulega hár styrkur járns, sem stundum hefur mælst í holum við Kröflu, örfi kísilútfellingar.

Ekki er vitað með vissu hvert hitastig er í neðra kerfi í Kröflu, þegar truflana frá blásandi borholum gætir ekki. Það mun þó líklegast liggja á bilinu $320\text{--}350^\circ\text{C}$, en gæti reynst hærra á meira dýpi en holurnar ná niður á. Þegar 340°C vatn sýður verður það mettað af ópal við $170\text{--}220^\circ\text{C}$, eftir því hversu mikil aukagufa er í holurennslinu (mynd 5). Samsvarendi verður kristóbalítmettun við $205\text{--}255^\circ\text{C}$. Hitastig í blásandi holum niður á um 2000 metra dýpi er á bilinu $220\text{--}280^\circ\text{C}$ eða lægra. Má því búast við útfellingum af kísil sem kristóbalít og jafnvel sem ópal í þeim holum,

sem ná niður í neðra kerfið, þótt þessi niðurstaða segi ekkert um hversu örur þær væru. Þegar neðra kerfis vatn og gufa blandast vatni úr efra kerfinu verður blandan undirmettuð og tekur þá fyrir ópalútfellingar. Þetta má sjá út frá kísilhita í borholum, sem fá vökva úr báðum kerfunum, en hann er yfirleitt á bilinu 225–270°C, og mynd 5.

Þótt vatn verði kísilyfirmettað með tilliti til einhverrar kísilsteindar, er ekki víst að útfellingar verði vandamál við rekstur borhola, þar sem útfellingin getur verið svo hæg. Með núverandi þekkingu er ekki unnt að segja fyrir um útfellingarhraða. Þó er vitað, að útfelling verður örari eftir því sem selta vex, hitastig hækkar og hún er tiltölulega hröðust við sýrustig samsvarandi pH 7–8. (skýrsla OS JHD 7601).

Til að komast hjá ópalútfellingum, ber að stilla þrýsting svo á holutoppi og í skiljum, að vatnið nái ekki ópalmettun. Ef fýsilegt þykir að hafa þrýsting í skiljum og á holutoppi það lágan, að vatnið sé yfirmettað af ópal, ber að grundvallarákvörðun þar að lútandi á tilraunum eða prófunum, sem gefa beina vitneskju um hraða útfellinga, tæknileg vandamál og kostnað við hreinsun. Í töflu 1 eru gefin upp ópalmettunarmörk fyrir einstakar borholur við Kröflu. Þegar suða færast smám saman lengra út í bergið vegna þrýstifalls í jarðhitageyminum samfara nýtingu verður alltaf einhver lækkun á kísil í holurennslinu vegna útfellinga kvars í berginu (Stefán Arnórsson, 1978). Þessi lækkun lækkar hitastig ópalútfellingamarka.

Ekki er unnt að hafa áhrif á kvarsútfellingar með stillingu þrýstings á holutoppi og ef til vill ekki heldur á útfellingar kristóbalíts. Reynslan verður að skera úr um, hvort þær valdi alvarlegum rekstrarörðugleikum. Varðandi útfellingar af þessu tagi og úrlausnir til sem bestrar nýtingar er nauðsynlegt að safna upplýsingum fyrir einstakar holur, sem taka til efnainnihalds vatns og gufu, rennslisbreytinga,

mælinga á þrýstingi í holum í blæstri og söfnun og efna- greininga af útfellingunum. Niðurstöður mundu miða að því að veita upplýsingar um hvernig best væri sneitt hjá útfellingarvandamálum af þessu tagi eða þau gerð sem minnst. Til að losna við þessar útfellingar væri líklega þyngst á metunum hversu djúpt skuli borað, eða öllu heldur að miða að því, að innstreymishitastig yrði neðan einhverra ákveðinna marka.

5. ÚTFELLINGAR ÝMISSA JÁRNEFNASAMBANDA

Útfellingar af járnefnasamböndum hafa fundist í borholum KJ-7 og KG-10. (skýrsla OS JHD 7820). Járnútfellingarnar eru bundnar við neðra kerfið. Þau járnefnasambönd, sem greind voru í útfellingum eru járn-súlfíðin pýrít (FeS_2) og pýrrhótít (FeS), magnetít (Fe_3O_4) og ókristallað járn-silíkat. Útfellingarnar eru nokkuð mismunandi í holunum tveimur. Þannig er pýrít ráðandi járn-súlfíð í holu KG-10 en pýrrótít í holu KJ-7. Járn-silíkat finnst í litlum mæli í holu KG-10 en er ráðandi í KJ-7. Magnetít finnst í báðum holunum. Í holu KG-10 finnst anhydrít (CaSO_4) með pýrítinu. Mismun í gerð járnútfellinga í holum KJ-7 og KG-10 má skýra með lægra hitastigi í KJ-7. Stafar það líklegast af meira þrýstifalli við suðu í fæðiaðum þeirrar holu, en ekki að ótruflað hitastand sé lægra en í aðum, sem streyma inn í KG-10.

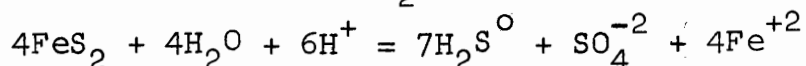
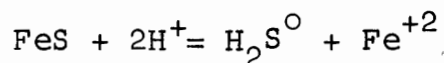
Í bergi ummynduðu af völdum jarðhitavatns er pýrít mjög algengt og pýrrhótít hefur fundist í nokkrum jarðhitasvæðum. Við suðu á jarðhitavatni skapast alltaf yfirmettun með tilliti til pýrítis og pýrrhótítis, ef lausnin var upphaflega mettuð. Þetta stafar af því, að uppleysanleiki þessara steinda minnkar með lakkandi hitastigi, (mynd 6) Ennfremur veldur suðan hækkun á sýrustigi (pH) soðna vatnsins, sem eykur á styrk súlfíðs (S^{-2}) í því og þar með á yfirmettun. Hækkun á sýrustigi við suðu eykur líkur á útfellingum magnetíts, þótt kælingin hafi öfug áhrif, en leysanleiki magnetíts vex með lakkandi hitastigi (mynd 7). Ekki er vitað til þess, að útfelling járn-silíkata hafi valdið rekstrartruflunum á borholum á jarðhitasvæðum annarstaðar en í Kröflu. Í járn-silíkatinu, sem er ókristallað efni, er hlutfall kísils við járn nokkuð breytilegt, eða milli 0.04 og 3.4 og er þá miðað við atómhlutfall. Ekki liggur ljóst fyrir, hvort þetta efnasamband hafi fallið beint út úr vatninu, eða hvort um sé að ræða útfellinu járnhydroxíða, sem sópa með sér kísil úr lausninni. Þessu mætti líka lýsa á þann hátt, að útfellingar járnhydroxíða virkuðu

hvetjandi á útfellingu kísils. Við tilraunir á Nýja Sjálandi hefur járn og aðrir málmar myndað kjarna fyrir útfellingu á kísil (uppl. frá Valgarði Stefánssyni).

Gögn yfir styrk járnns í jarðhitavatni eru takmörkuð. Eina úttektin, sem fyrir liggur varðandi heitt vatn hér á landi, var unnin á árunum 1967-69 (Arnórsson, 1969, 1970). Af henni má draga þá ályktun, að styrkur járnns í heitu vatni er mjög lágur, eða gróflega á bilinu 5-25 míkrogrömm/kg, en samt nokkuð hærri, þegar um salt vatn (jarðsjó) er að ræða. Tilraunir, sem hafa verið gerðar á síðustu árunum og nú eru í gangi sýna, að styrkur járnns í lausn vex mjög hratt með hitastigi, þegar upp fyrir 350-400°C kemur. Sést þetta af mynd 8, sem tekin er frá Mottl (1976). Niðurstöður Mottl byggja á tilraunum, þar sem sjór og basalt er hitað saman. Efnagreining á járnni í borholum af Reykjanesi ber vel saman við niðurstöður tilrauna Mottl. Í um það bil 250° heitum jarðsjó er styrkur járnns nálægt 500ppb (0,5 ppm) en við 400° 100ppm. Til samanburðar má nefna, að í ósöltu jarðhitavatni eins og við Kröflu mun styrkur járnns við 250° vera af stærðargráðunni 10ppb.

Lítill vitneskja liggur fyrir um efnahvörf milli steina í bergi og uppleysts járnns, sem gætu ráðið leysanleika þess í jarðhitavatni. Þó benda reikningar til, að ósalt djúpvatn á háhitasvæðunum sé mettað af pýríti og pýrrhótíti. en að heitur jarðsjór sé mettaður af pýríti einu (Gunnlaugsson, 1978).

Sé gert ráð fyrir jafnvægi við pýrrhótít eða pýrít má út frá efnagreiningum á heitu vatni og útreiknaðri virkni súlfats, súlfíðs og sýrustigs, áætla hlutfallið Fe^{+2}/H^+ . Sést þetta af eftirfarandi efnahvörfum:



Á mynd 9 er sýnt hvert hið útreiknaða járn/prótónu hlutfall er miðað við pýrrhótít jafnvægi annars vegar og pýrít jafnvægi

hins vegar. Þegar tekið er tillit til skekkja, sem koma inn í reikninginn á járn/prótónu hlutfallinu, svo sem skökk gildi fyrir hina ýmsu jafnvægisstuðla, verður að teljast, að samanburður sé góður, hvort heldur miðað er við pýrít eða pýrrhótít. Niðurstaðan er talin benda til þess, að jónaskiptajafnvægi í lausn geti ráðið styrk járnns miðað við sýrustig. Nú hefur verið sýnt fram á, að sýrustig jarðhitavatns ákveðst af seltu þess og hitastigi eingöngu (Arnórsson o.fl. 1978). Sé gengið út frá því, að hlutfallið $\text{Fe}^{+2}/\text{H}^+$ sé eingöngu háð hitastigi eins og mynd 9 gefur til kynna, má út frá þeirri mynd giska á styrk járnns í jarðhitavatni miðað við ákveðna seltu og hitastig. Þessi ágiskun tekur til Fe^{+2} en ekki til alls þess járnns, sem í lausn væri. Út frá mynd 9 og með hliðsjón af mynd 10, sem sýnir samband Na^+/H^+ við hitastig og þeirri staðreynd, að natríum er ríkjandi katjón í öllu jarðhitavatni má finna út, að virkni Fe^{+2} við sömu seltu fer heldur minnkandi með vaxandi hitastigi. Við fyrstu athugun virðist það í ósamræmi við niðurstöður tilrauna Mottl. En þess ber að gæta, að járn í vatnslausn hefur mikla tilhneygingu til þess að mynda efnasambönd með öðrum efnum í lausn og því meiri sem hitastigið er hærri.

6. ÁHRIF ELDSUMBROTANNA

Við eldsumbrotin, sem hófust í desember, 1975, jókst mjög styrkur kolsýru í neðra kerfis æðum vegna streymis frá kviku undir jarðhitageyminum. Samfara þessu kolsýrustreymi verður að teljast líklegt, að eitthvað gufustreymi hafi átt sér stað frá kvikunni. Sé miðað við það hlutfall gufu og kolsýru, sem mældist í eldfjallagasi í Surtseyjargosinu, og 3% kolsýru í neðra kerfinu reiknast, að 14% af H_2O neðra kerfis sé komið frá nýju kvikuinnskoti. Í raun mun þessi tala eitthvað lægri vegna þess að basaltkvika er fjær því að vera mettuð af gufu en kolsýru. Leitar kolsýran því fyrr úr kvikunni en gufan við kælingu og storknun. Þó sýna þessar tölur, að gufuútsstreymi frá kvikuinnskoti mynduðu í tengslum við eldsumbrotin hlýtur að hafa aukið varmann í jarðhitageyminum verulega. Miðað við 300° heitt vatn á suðumarksferli hefði þessi gufa dugað til þess að láta tæp 30% af vatninu gufa upp við óbreytt hitastig. Er þá miðað við, að orka eldfjallagufunnar sé 1000kcal/kg, en það samsvarar um það bil 800° hita og 300 bar þrýstingi. Ólíklegt verður að teljast, að eldfjallagufan hafi alltaf blandast jafnt við jarðhitavökvann og þegar hún hefur náð að vera tiltölulega stór hluti blöndunnar, gæti allt jarðhitavatnið hafa gufað upp og hitnað frekar. Vökvi, sem á þann hátt hefði náð háu hitastigi ($400-500^\circ C$?) gæti vafalaust skolað út það miklu járninu úr berginu, að styrkur þess í lausn næmi tugum ppm. Við ört streymi til yfirborðs og inn í borholur kólnaði þessi vökvi vegna þrýstifalls og járníð tæki að falla út. Með þessu móti mætti skýra tíma-bundið svart grugg járnútfellinga í vatni sumra holanna og hinn háa styrk uppleysts járns í vatninu. Sé þessi skýring rétt, eru vandamál útfellinga af járnefnasamböndum í neðra kerfi orsökunni af eldsumbrotunum og mætti búast við, að magn útfellinga væri meira eftir því sem holur væru dýpri og eftir því sem þær væru nær útsstreymi frá kviku (gossprungunni við Leirhnúk?).

Það er ekki í samræmi við þau takmörkuðu gögn um uppleysanleika járns í vatni að 300–350°C heitt vatn eins og er í neðra kerfinu í Kröflu geti geymt í lausn nokkra tugi ppm af járni eins og mælst hefur. Er þá miðað við tilraunaniðurstöður Mottl og þá staðreynd að tiltölulega ósalt vatn eins og í Kröflu leysir upp minna járn en sjór, sem Mottl notaði í tilraunum sínum. Er nærtækast að skýra hinn háa styrk járns, sem stundum hefur mælst í vatni úr neðra kerfi í Kröflu með því að þetta vatn eða vökví hafi verið mun heitara en 350°C og við kælingu samfara suðu hafi útfelling járnefnasambanda ekki verið nægileg til þess að má út áhrif þess, að vökvinn hafi náð herra hitastigi.

Nú er unnið að gerð tölvuprógrams, sem miðar að því, ásamt efnagreiningum af járni í vatni úr borholum við Kröflu að skýra hvaða efnajafnvægi við steindir ráða uppleysanleika járns í jarðhitavökvanum og hver styrkur járns í lausninni væri við mismunandi hitastig og seltu. Ennfremur að skýra á magnbundinn hátt hvaða breytingar á hita og þrýstingi og efnasamsetningu vökvans ráða útfellingum hinna ýmsu járnefnasambanda. Vonast er til, að þessi úrvinnsla muni varpa einhverju ljósi á skilning á járnútfellingum og að nota megí niðurstöðurnar til leiðbeiningar um hvernig haga skyldi borunum (staðsetning og dýpi) til þess að komast fyrir eða sneiða sem mest hjá útfellingarvandamálinu. Það er naumast við því að búast, að gerð tölvuprógrammsins og síðan úrvinnslu gagna verði lokið fyrr en í júní–júlí á þessu ári.

7. UMRÆÐA

Þótt niðurstöður varðandi útfellingar í borholum séu enn óljósar í ýmsu tilviki að því er varðar járnefnasamböndin, þykir rétt á þessu stigi að varpa fram ýmsum hugmyndum sem til hafa orðið um hvernig losna mætti við þessá vandamál svo og vandamál af öðrum útfellingum.

Einfaldast er að reyna að losna við kalkútfellingar með því að bora þar, sem efra kerfið svokallaða rennur saman við neðra kerfið, eða með öðrum orðum, þar sem berghiti fylgir suðumarksferli. Öðrum kosti verður að fódra efra kerfið af, ef borað er niður í vatnsæðar í neðra kerfi. Er þá um 1100 metra djúpa vinnslufóðringu að ræða eða þar um bil. Miðað við aðrar niðurstöður um rennsli úr æðum í efra kerfi, sem sýna að það er hverfandi hluti af heildarrennsli nýtanlegra hola, virðist naumast til að dreifa þeirri lausn að leysa kalkútfellingavandamálið með tímabundnum hreinsunum eins og verið hefur með sumar borholur í Hveragerði á undanförnum árum.

Eftir því sem holur ná lengra niður í neðra kerfið og hitastig er herra virðast líkur á því að vandamál vegna útfellinga kísil- og járnefnasambanda verði meira. Lausn á þessu vandamáli ætti því að beinast að því að reyna árangur af borholum, sem næðu styst niður í neðra kerfið. Reynsla af holu KJ-9 styður þessa ályktun.

Ef drægi úr járnútfellingum mætti líka gera ráð fyrir því, að kísilútfellingar mundu minnka, sérstaklega ef útfellingar járnefnasambanda virka hvetjandi á kísilútfellingar.

Þar sem magn járnútfellinganna gæti fyrst og fremst stafað af áhrifum eldsumbrotanna, má búast við að þær dvíni, þegar dregur úr streymi frá kvikuinnskötinu. Ekki virðist unnt að segja með neinni vissu hversu langan tíma þessara áhrifa

gæti gætt. Sömuleiðis er við því að búast, að rekstrar-örðugleikar vegna útfellinga minnki við aukna nýtingu svæðisins vegna þrýstifalls, sem hún veldur og frekari færslu á suðu út í bergið.

Sú nálgun á útfellingarvandamálinu, sem hér er farin að skýra ytri (hiti, þrýstingur) og innri (efnasamsetning) aðstæður magnbundið, sem ráða því hvort útfellingarhætta sé til staðar eða ekki felur í sér athugun á útfellingum, efnagreiningar á vatni og gufu og efnaorkufræðilegri túlkun á niðurstöðum.

Ekki væri rétt að ganga út frá því sem vísu, að reikningslegar niðurstöður stæðust og taka ákvörðun m.a. á grundvelli þeirra um endanlega gerð og frágang borhola.

Niðurstöður sem þessar ber að nýta við ákvörðun um hvernig skuli borað og fylgt eftir með prófunum á holunum, eftir að þær hafa verið boraðar.

TILVITNANIR

- Arnórsson, Stefán (1969): A geochemical study of selected elements in thermal waters of Iceland. Doktorsritgerð, Lundúnarháskóli, 353 bls.
- Arnórsson, Stefán (1970): The distribution of some trace elements in thermal waters in Iceland. Geothermics, special issue, 3, 5, 542-546.
- Arnórsson, Stefán (1976): Kísill og brennisteinsvetni í affallsvatni frá gufuborholum, Oð JHD 7601, 29 bls.
- Arnórsson, Stefán (1978): Precipitation of calcite from flashed geothermal waters in Iceland. Contrib. Mineral. Petrol, 66, 21-28.
- Arnórsson, Stefán (1978): Changes in the chemistry of water and steam discharged from wells in the Námafjall geothermal field, Iceland during the period 1970-76. Jökull í prentun.
- Arnórsson, Stefán og Sigurðsson, Sven (1974): The utility of water from the high-temperature areas in Iceland for space heating as determined by their chemical composition. Geothermics, 4.
- Arnórsson, Stefán, Grönvold, Karl og Sigurðsson, Sven (1978): Aquifer chemistry of four high-temperature geothermal systems in Iceland. Geochimica et Cosmochimica Acta, í prentun.
- Gunnlaugsson, Einar (1977): The origin and distribution of sulphur in fresh and geothermally altered rocks in Iceland. Doktorsritgerð, Leedsháskóli, 192 bls.
- Mottl, Michael James (1976): Chemical exchange between sea water and basalt during hydrothermal alteration of oceanic crust. Doktorsritgerð, Harvardháskóli 188 bls.

Truesdell, A.H og Singers, W (1974): The calculation of
aquifer chemistry in hot-water geothermal systems.
J. Res. U.S. Geol. Surv. 2, 271-278.



ORKUSTOFNUN
Jarðhitadeild

78 05 30 SA/IS

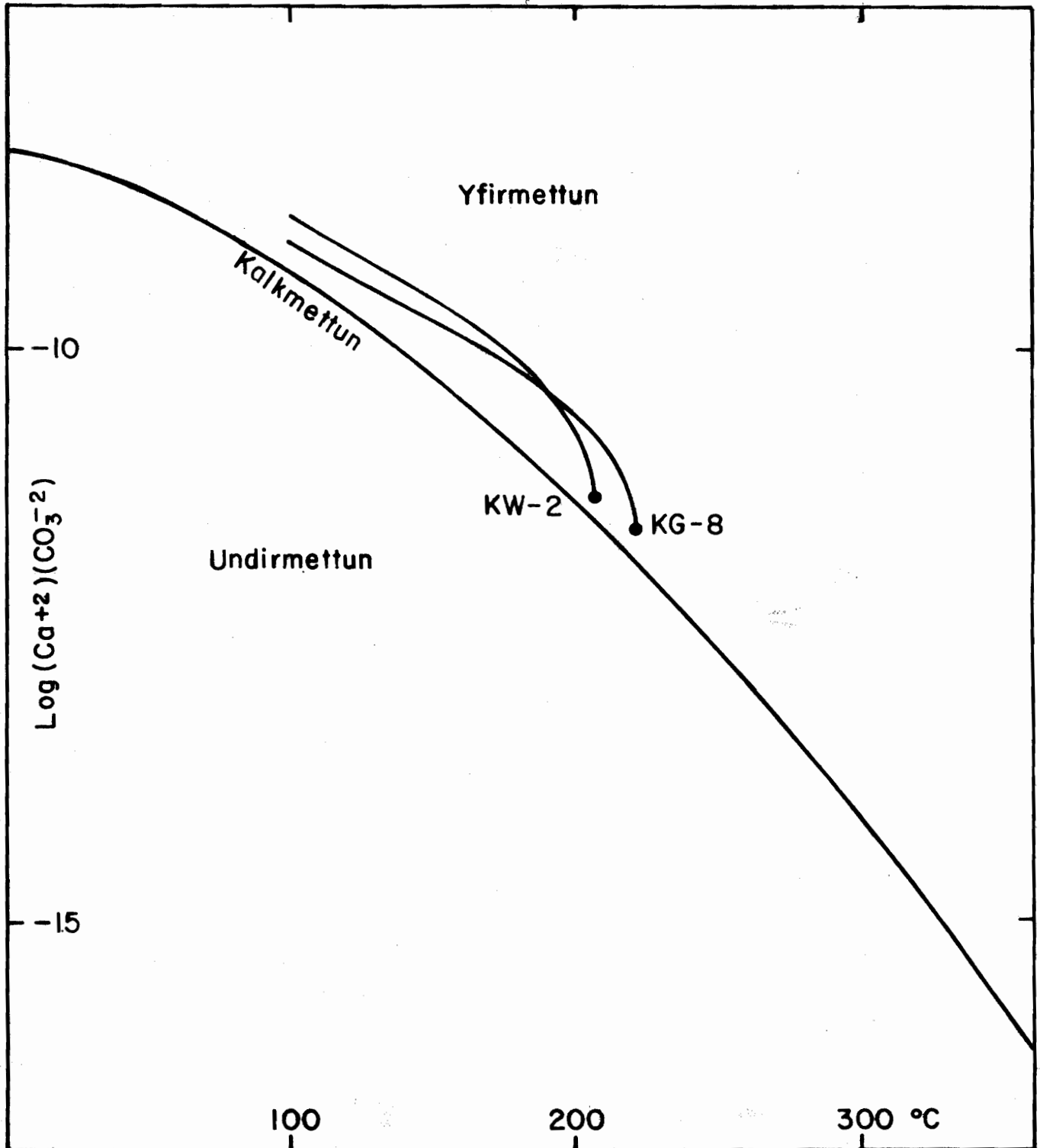
T-282 T-625

Jarðefnaf. Kröfla

F-17155

Kalkmettun í borholum KW-2 og KG-8 í Kröflu

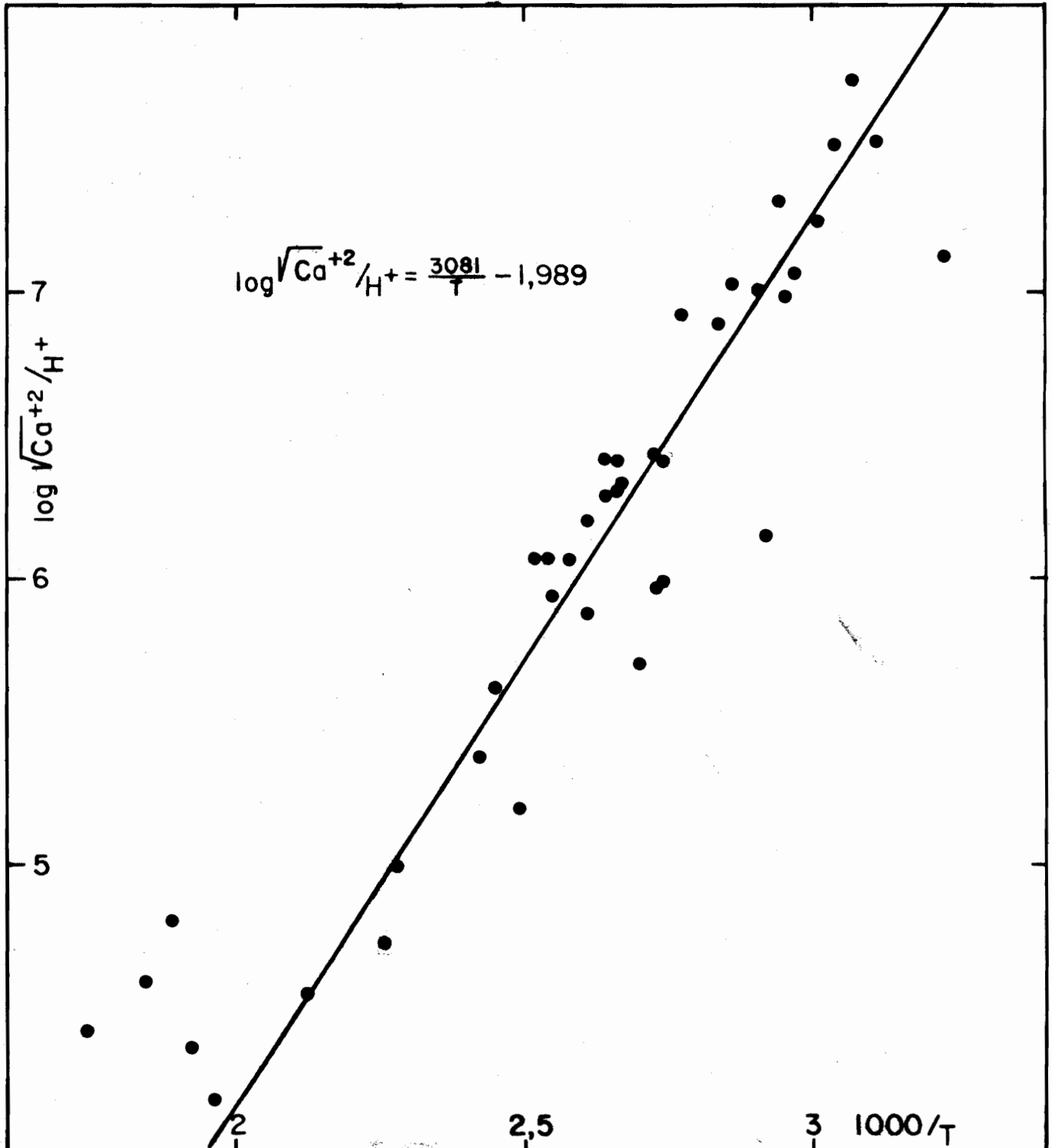
Mynd I





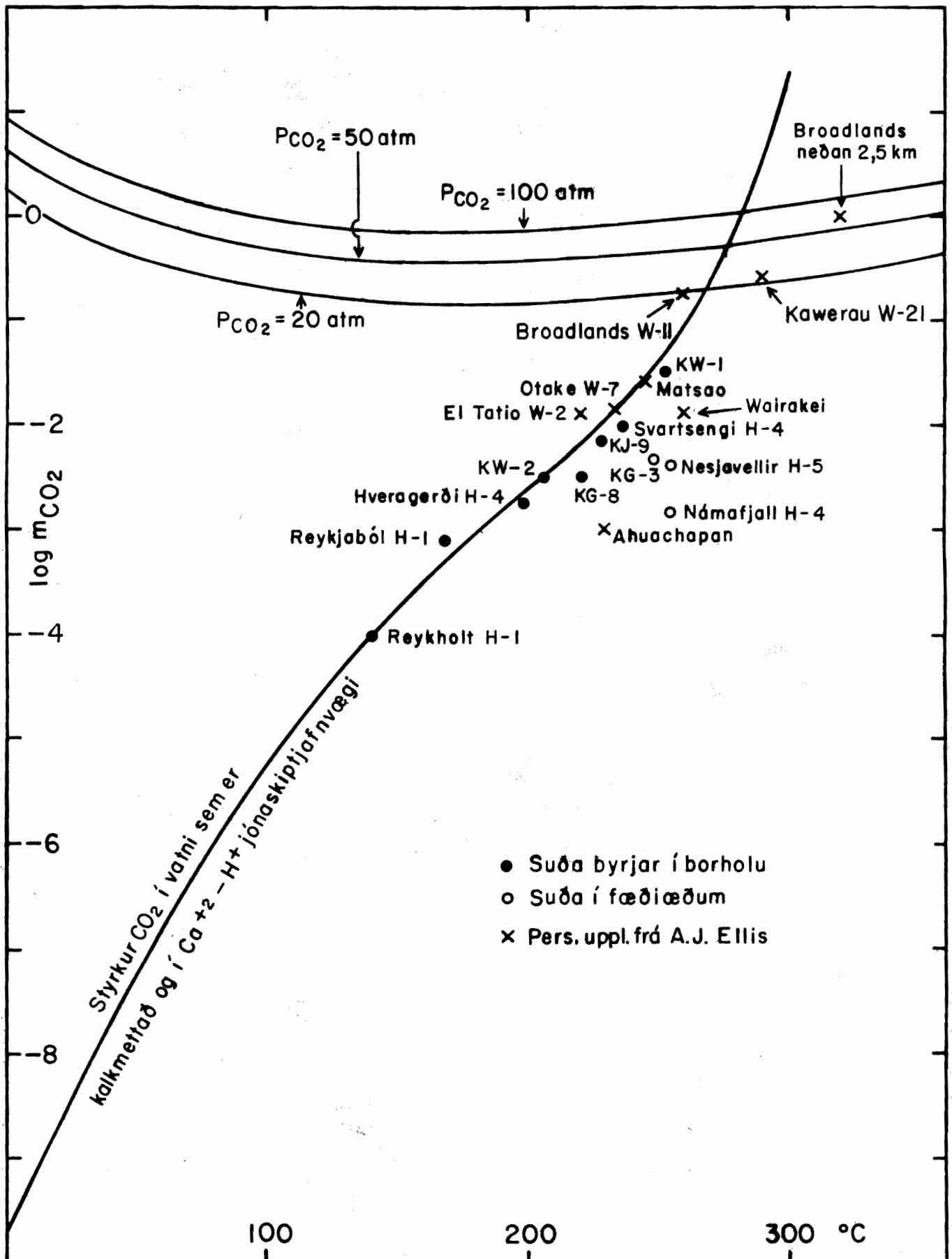
$\text{Ca}^{+2}-\text{H}^{+}$ jónaskiptajafnvægi í jarðhitavatni

Mynd 2





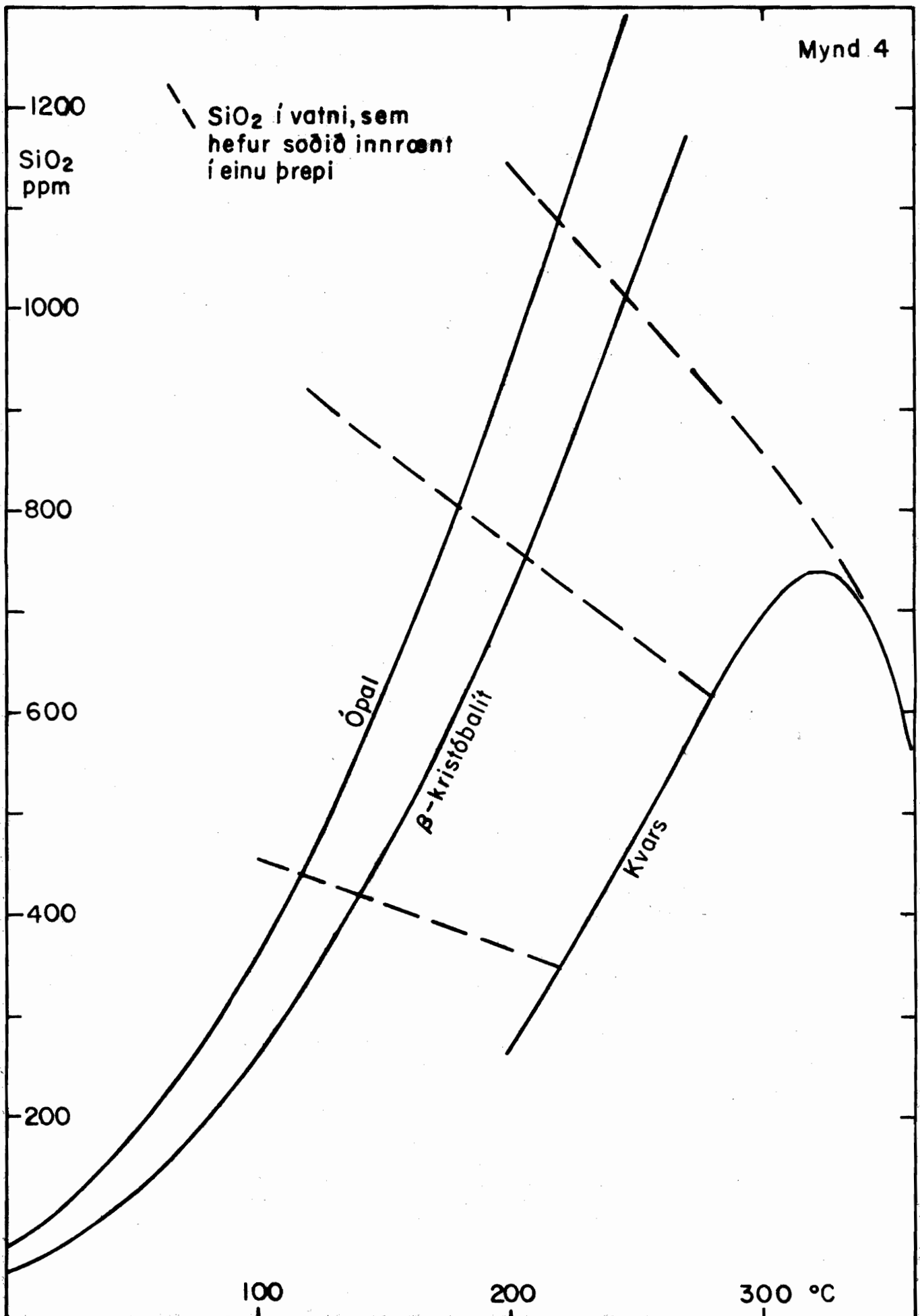
Mynd 3





Upplýsanleiki kvars, β -kristóbalítis og ópals í vatni við suðu

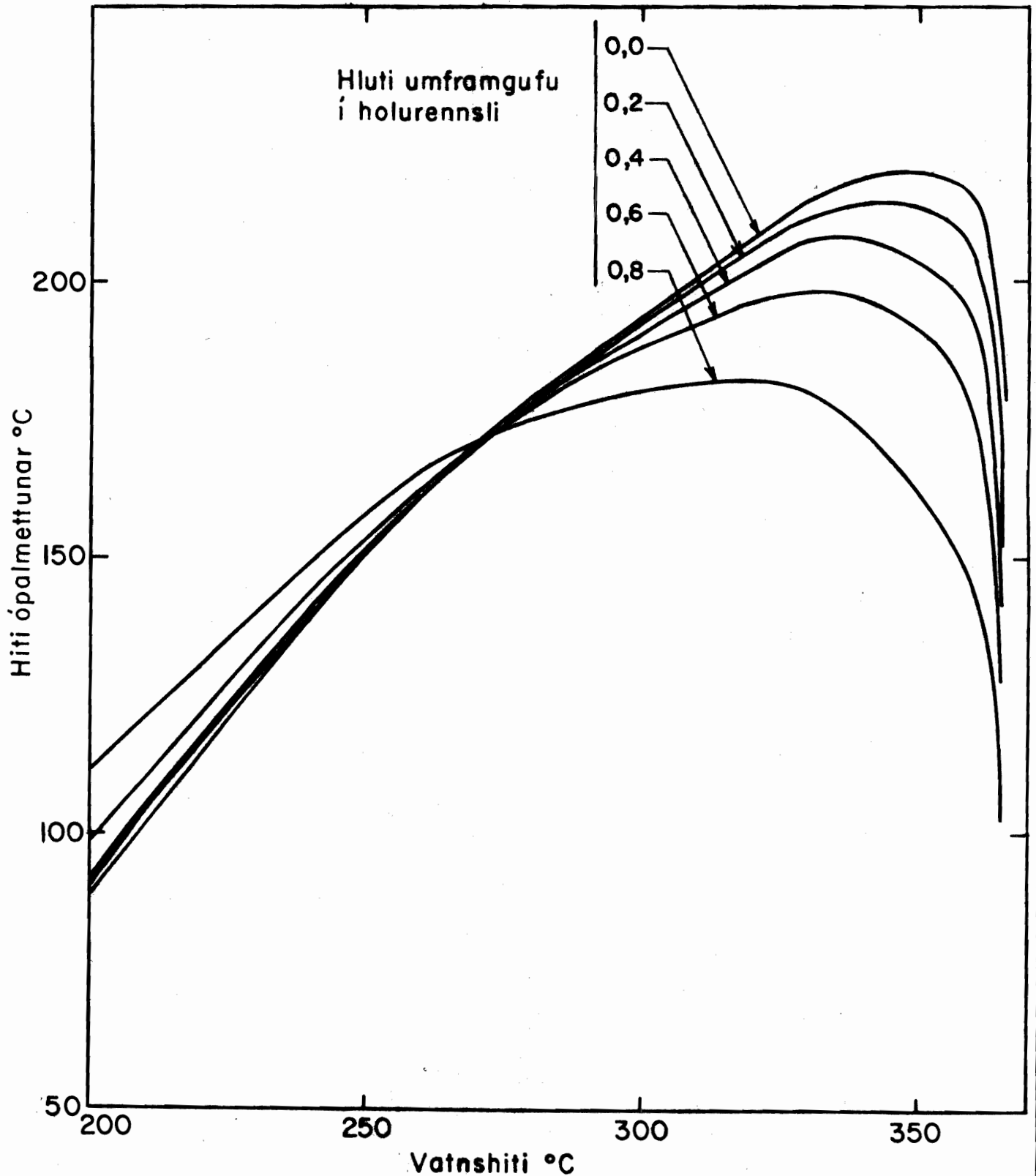
Mynd 4





Samband djúpvatnshita, gufuhluta og ópalmettunar

Mynd 5





ORKUSTOFNUN

Jarðhitadeild

Uppleysanleiki pýrits (FeS_2) og pýrrhótíts (FeS)
á hitabilinu $0,360^\circ\text{C}$

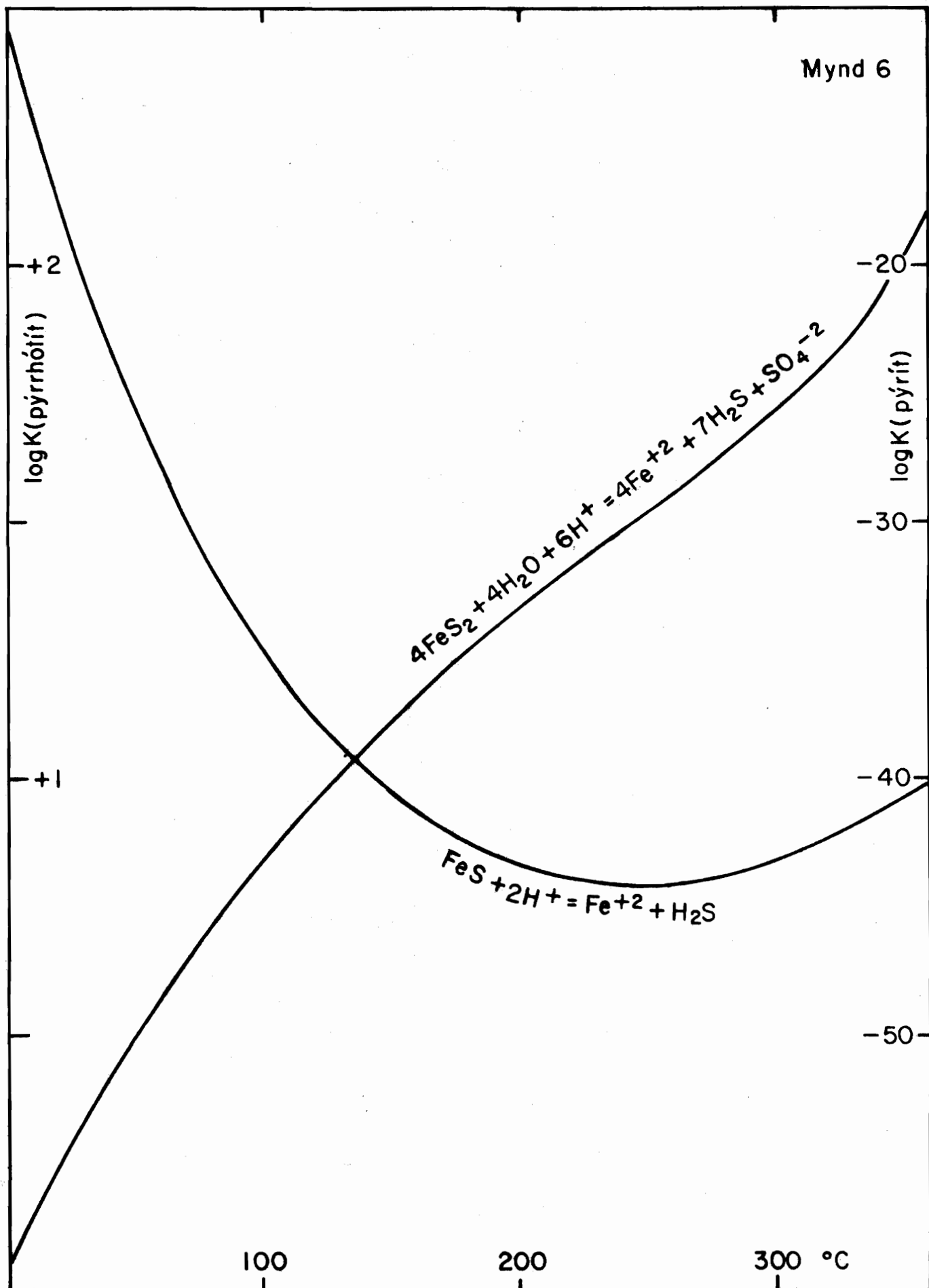
78 05 30 SA / IS

T-285 T-686

Jarðhefnafr. Ým.

F-17158

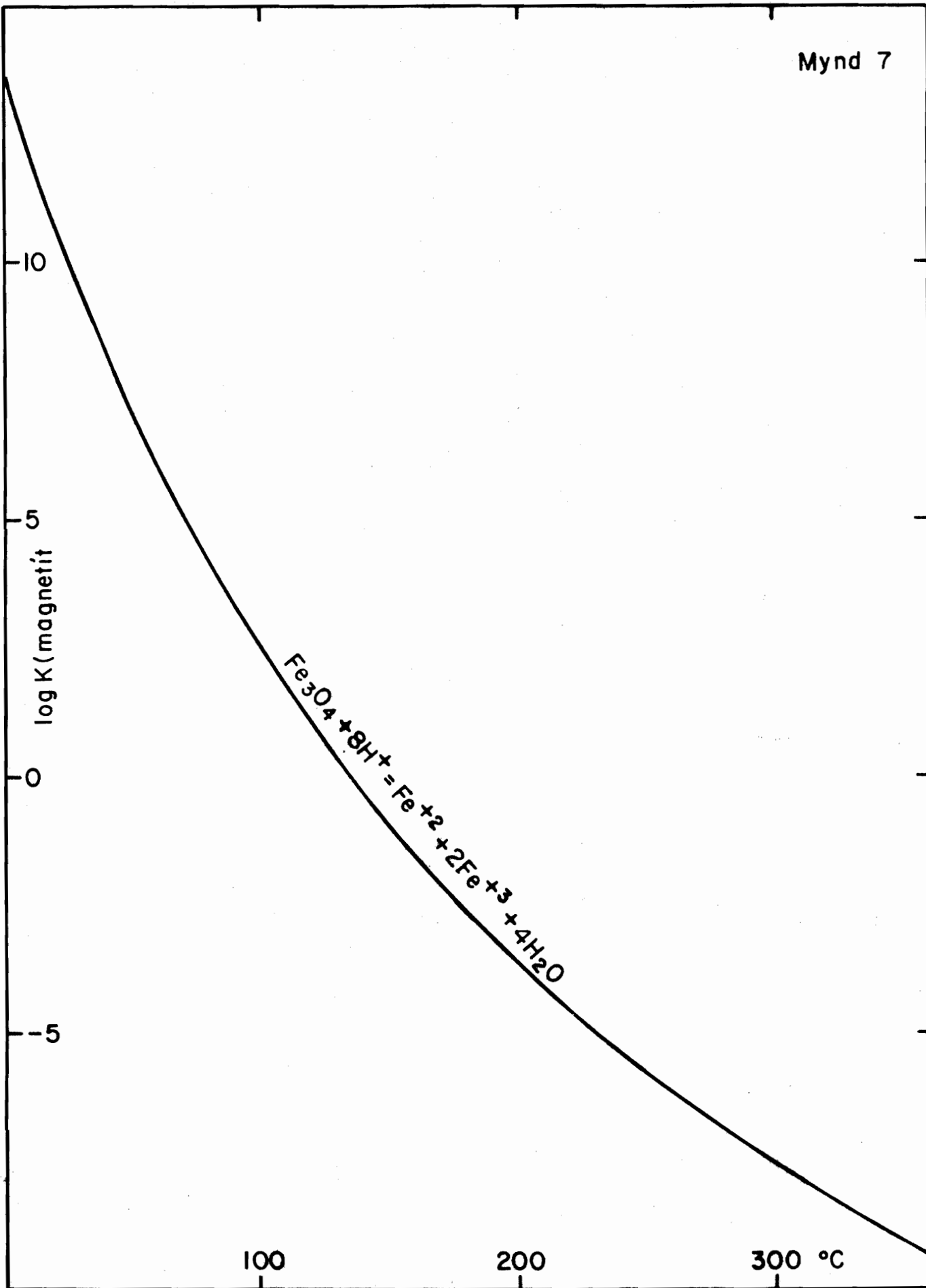
Mynd 6





Upplýsanleiki magnetíts (Fe_3O_4) á hitabilinu 0 - 360 °C

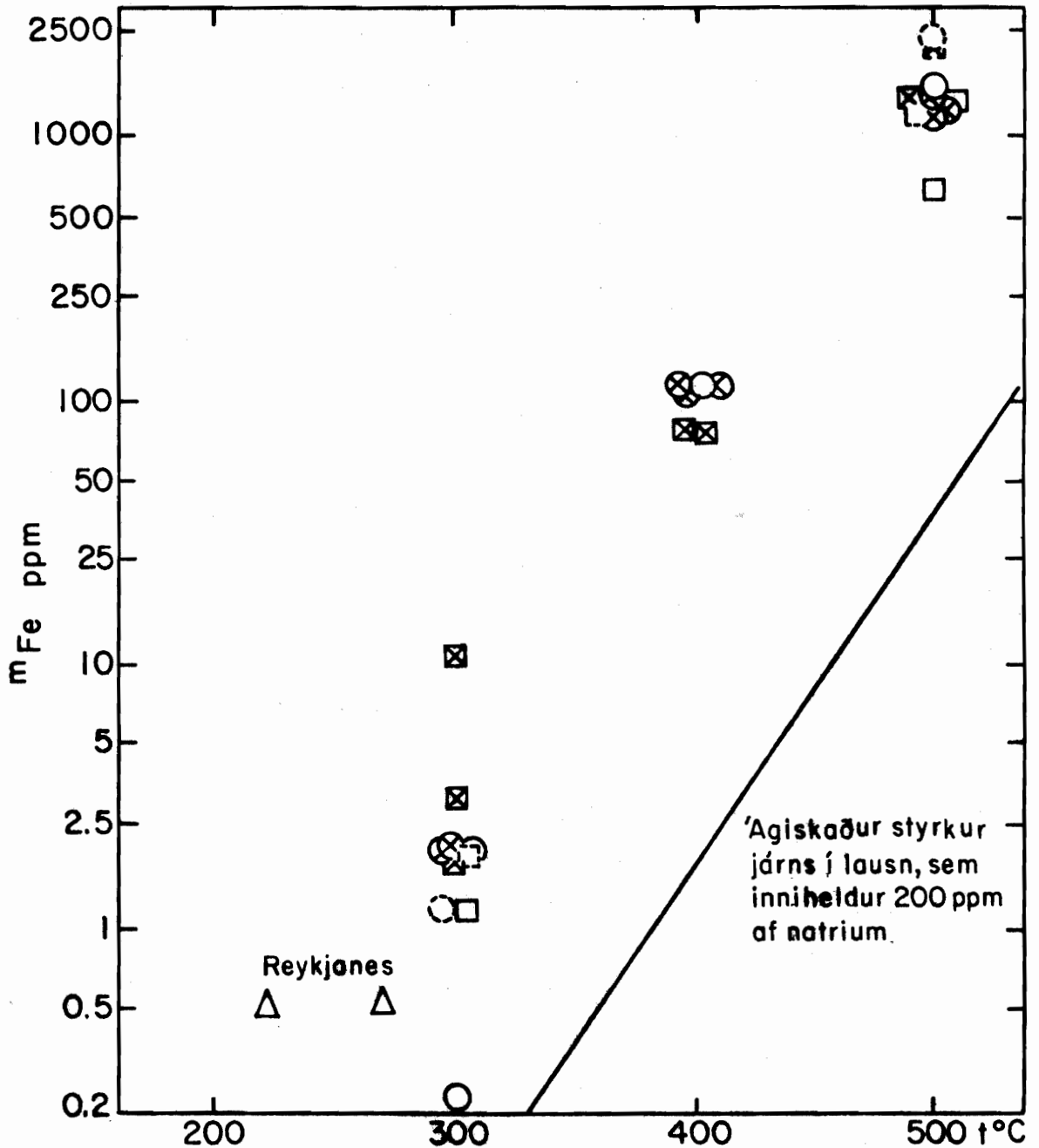
Mynd 7





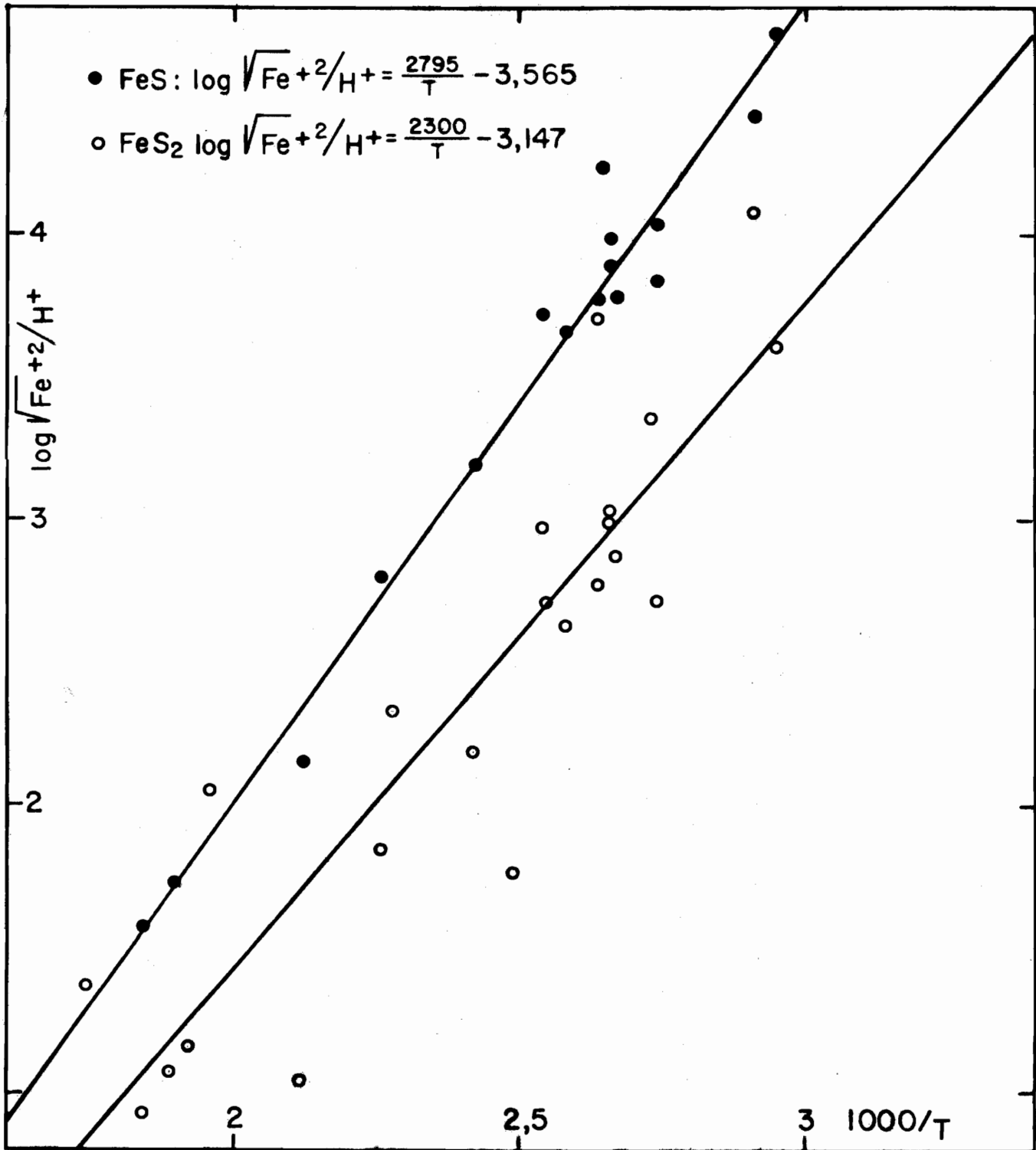
Styrkur járns í sjó, eftir upphitun með basalti
Frá Mottl (1976)

Mynd 8





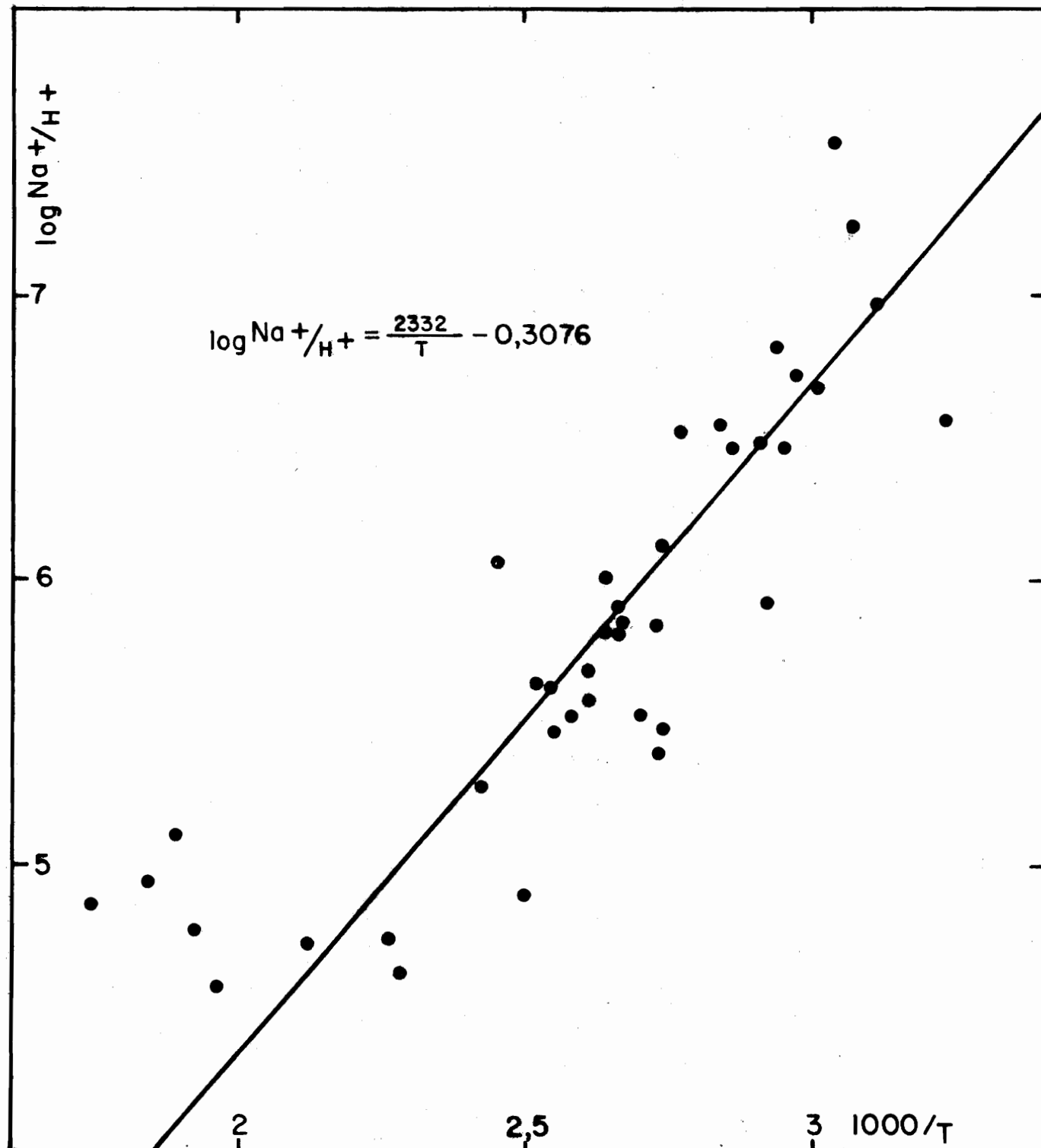
Mynd 9





Na⁺ - H⁺ jónaskiptajafnvægi í jarðhitavotni

Mynd 10



Tafla 1. Ópal útfellingamörk (kísilútfellingamörk) fyrir borholur í Kröflu.

Hóla	Sýni nr.	Ópalmettun	
		Vatnshiti °C	Gufubrýst. bar
KW 1	08771161	148	3,8
KW 2	08771160	107	0,3
KG 3	06760065	149	3,9
KJ 6	03771034	162	5,9
KJ 7	04771086	158	5,2
KG 8	04771094	120	1,0
KJ 9 ^a	12771206	182	10,1
KG 10	10771193	135	2,3
KJ 11	04771083	122	1,2

^aEftir dýpkun árið 1977.