

**Forðafraeðistuðlar. Hugleiðingar um kalsít  
(og pýrít) í jarðhitakerfum**

**Hjalti Franzson**

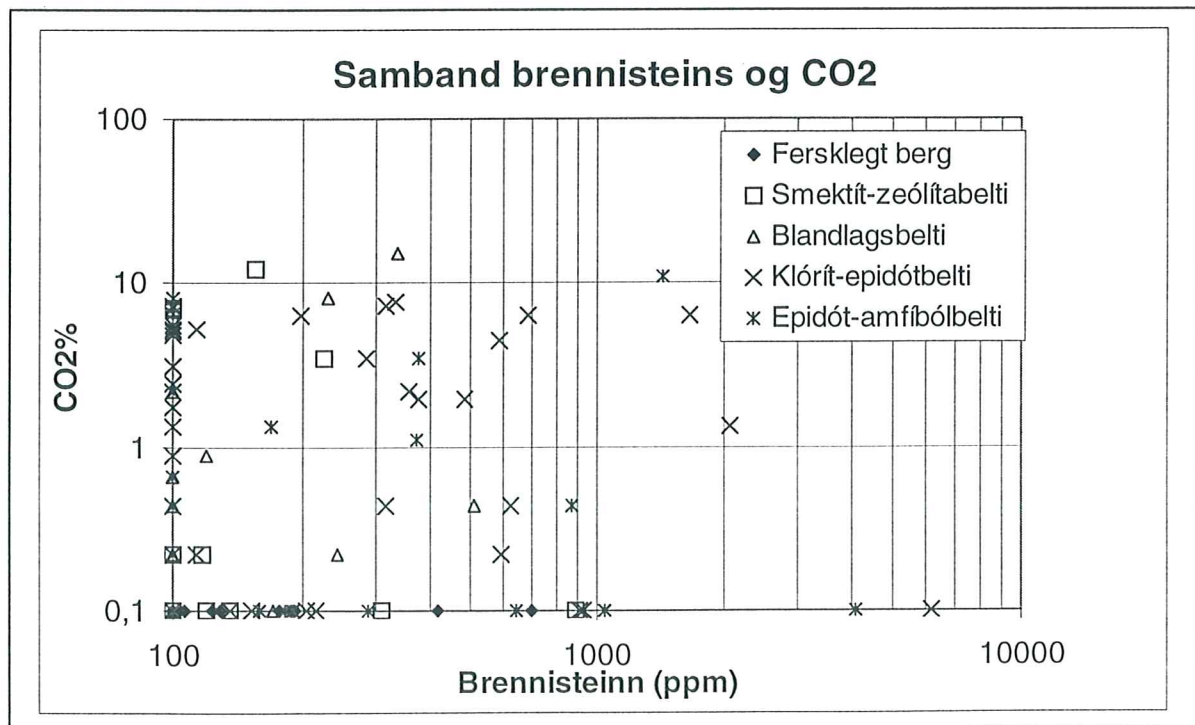
**Greinargerð HF-98-05**

FORÐAFRÆÐISTUÐLAR  
HUGLEIÐINGAR UM KALSÍT (OG PÝRÍT) Í JARÐHITAKERFUM  
Hjalti Franzson

**Inngangur**

Í fyrri greinargerðum og skýrslum (Hjalti Franzson 1998(a,b), Hjalti Franzson o.fl.1997), hefur nokkuð verið fjallað um koltvísýring ( $\text{CO}_2$ ), kalsít og bundið vatn í bergi. Eitt af þeim efnum sem tengist  $\text{CO}_2$  í jarðhitakerfum, og ekki hefur verið minnst á er brennisteinsvetni ( $\text{H}_2\text{S}$ ). Á mynd 1 er sýnt samband  $\text{CO}_2$  sem reiknað hefur verið út á grundvelli kalsíts í þunnarneiðagreiningum og brennisteins í bergi, og hafa sýnin verið flokkuð með tilliti til þeirra ummyndunarbelta sem þau fundust í. Þessa mynd er ekki auðvelt að túlka. Unnt er að segja að meiri hluti sýna hefur annað hvort kalsít eða brennistein í einhverjum mæli, og liggja þau sýni því annað hvort á x- eða y-ásnum. Hluti af sýnahóp klórít-epidót og epidót-amfíbólbelteisins hefur þó bæði  $\text{CO}_2$  og S. Þetta, að hluta til, óreglulega samband  $\text{CO}_2$  og S, auk umræðna við þá efnafræðinga Halldór Ármannsson og Jón Örn Bjarnason, varð kveikjan að því að freista þess að tengja þessar steindir við ákveðna atburði í grunnvatns- og jarðhitakerfum.

Í greinargerð þessari verður fyrst fjallað um við hvaða aðstæður kalsít og pýrít falla út úr vökva og helztu efnaþafnvægi. Síðan verður fjallað um mismunandi gerðir kalsíts og áhrif kalsíts á bergumyndun. Að lokum verða gögnin sett í samhengi við almennt grunnvatns- og jarðhitakerfi.



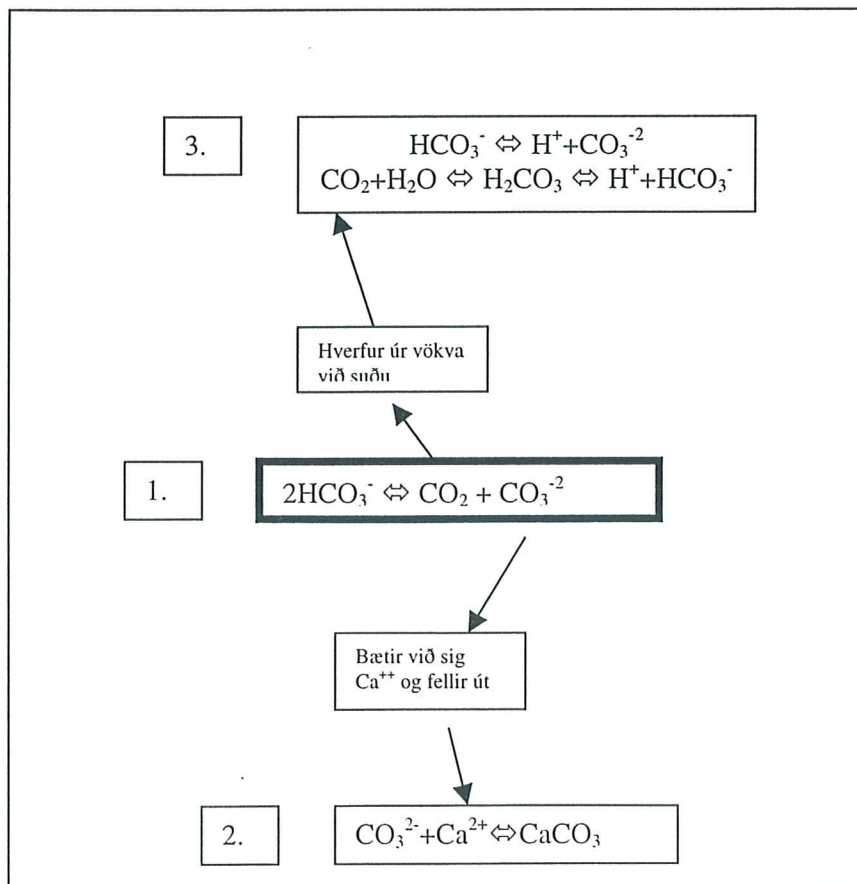
## 2. Útfelling kalsíts samkvæmt efnafræði

Koldíoxíð í grunnvatni er aðallega af tvennum uppruna. Kalt grunnvatn fær karbónat úr andrúmslofti (úrkomu) og að einhverju leyti úr berginu sem það síast í gegnum. Grunnvatn hér á landi er nærri mettunarmörkum kalsíts. Á hinn bóginn afgangast kvika og koldíoxíð lekur inn í skorpu, og þaðan fer það inn í jarðhitakerfi.

Kalsít fellur aðallega út á tvennan máta;

- Ef vökvi sem mettaður er af karbónati ( $\text{CaCO}_3$ ) er hitaður upp yfirmettast hann og fellir út kalsít. Grunnvatn er ýmist mettað eða undirmettað með tilliti til kalsíts (Sigurður Gíslason og Stefán Arnórsson 1990, Halldór Ármannsson pers. uppl.). Við hitnun yfirmettast það og fellir út kalsít.
- Við suðu jarðhitavökva, sem mettaður er  $\text{CaCO}_3$ , sleppir hann frá sér  $\text{CO}_2$  sem gasi og vökvinn, sem eftir er, yfirmettast og kalsít fellur út.

Í báðum tilvikum verður að gera ráð fyrir lekt, þ.e. að vökvinn verður að flytjast úr stað (þeim möguleika að hitagjafinn flytjist úr stað er ekki tekinn inn í myndina). Á mynd 2 eru sýndar helztu efnajöfnur fyrir þær jónir sem helzt koma við sögu við myndun á kalsíti við suðu. Samkvæmt *jöfnu 1* veldur brotthvarf  $\text{CO}_2$  úr vökvanum því að efnahvarfið gengur til hægri og aukning verður á  $\text{CO}_3^{2-}$ , en sú jón bætir við sig  $\text{Ca}^{2+}$  úr berginu og fellir út kalsít samkvæmt *jöfnu 2*. Ef suðan er öflug og gasið heldur áfram að sleppa úr vökvanum veldur það auknu magni af  $\text{CO}_3^{2-}$  í vökvanum, sem aftur eykur þörfina að grípa til sín  $\text{Ca}^{2+}$  úr berginu. Það Ca sem tiltækt er í fersku bergi, er til staðar í frumsteindunum pýroxen og plagióklasa, og svo í gleri. Líkindi eru á því að bæði plagióklas og pýroxen séu óstöðugar við hita yfir  $200^\circ\text{C}$ , þar sem sú fyrirnefnda ummyndast yfir í albít og hrekur frá sér Ca, og pýroxeninn hefur tilhneigingu til að brotna niður í ummyndunarsteindir.



### Mynd 2. Helztu efnahvörf kalsíts

Það  $\text{CO}_2$  sem losnar úr vökvánum við suðuna leitar upp á við og samkvæmt þeim *jöfnum 3*. hvarfast það við það vatn sem það hittir á leið sinni. Samkvæmt upplýsingum frá Halldóri Ármannssyni, er líklegt að sá gufuríki vökvi sé ekki langt frá mettunarmörkum. Nái gufuríka blandan upp í grunnvatnskerfi, sem skv. skilgreiningu er mettað með tilliti til kalsíts, orsakar það yfirmettun, bæði vegna upphitunar grunnvatnsins, en ekki síður vegna þess að jafna 3 gengur til hægri og veldur aukningu á  $\text{CO}_3^{-2}$  auk þess að lækka sýrustig vökvans. Aukning  $\text{CO}_3^{-2}$  leiðir svo aftur til kalsít útfellinga.

Brennisteinsvetni ( $\text{H}_2\text{S}$ ) er upprunnið í kviku, líkt og  $\text{CO}_2$ . Háhitakerfin eru yfirleitt í jafnvægi við pýrít. Vatn sem er að sjóða fellir út pýrít þrátt fyrir að það sé að losa sig við  $\text{H}_2\text{S}$  sem gas, vegna þess að jafnvægisfast  $\text{H}_2\text{S}(\text{gas})/\text{H}_2\text{S}(\text{vökvi})$  er lágur. Það þýðir að vatnið sem eftir er við suðuna verður bæði yfirmettað með tilliti til pýríts og ekki síður að það kólnar við suðuna og eykur yfirmettunina. Pýrít ætti því ófrávíkjanlega að falla út við suðu í háhitakerfi, svo fremi að nægilegt magn af brennisteinsvetni sé til staðar í vökvánum. Við öflugna suðu í jarðhitakerfi ætti því bæði kalsít og pýrít að falla út. En hér hættir samhæfing þessara efna, því við kælingu vökva eykst yfirmettun m.t.t. pýríts, en leiðir til undirmettunar m.t.t. kalsíts.

### 3. Kalsít og pýrít í bergi

Höfundur hefur á síðastliðnum árum fengið aukinn áhuga á að kanna mismunandi útfellingagerðir kalsíts eins og það kemur fyrir augu í svarfgreiningu og í þunnsneiðum, einkum þó í háhitakerfum. Einnig hefur verið litið á hvers lags áhrif það hefur á grannbergið, og hvaða steindir falla út í tengslum við það.

Við lítinn hita, svo sem í volgu grunnvatni verður ekki mikið vart við kalsít, og ef það finnst er það gjarnan sem aragonít ('dogtooth' kalsít). Í sjávarblönduðu vatni falla einnig út önnur karbónöt eins og magnesít, síderít og dólómít. Við þessar aðstæður verður ekki vart við neina umtalsverða ummyndun bergsins þar sem kalsítið fellur út.

Kalsít er miklu algengara í háhitakerfum, og kemur þar fyrir í mörgum kristalgerðum. Kalsítæðar hafa ýmist engin áhrif á grannbergið, eða smitar það með kalsíti. Kalsítummyndun bergsins er mjög breytileg. Í sumum tilvikum sést kalsítummyndun herja á plagíóklas, stundum á pýroxen og stundum hvorutveggja. Slík sýn er áhugaverð sérstaklega ef það er skoðað m.t.t. efnahvarfanna á mynd 2, og má túlka sem árás vökvans á steindir til að nálgast  $\text{Ca}^{++}$  og fella um leið út kalsít. Slíkar aðstæður gætu verið einkenni suðu vökvans. Annað sérkenni sem, oft sést við þessar aðstæður, er að kalsítlög hafa troðið sér inn á milli steindalaga í holu- og sprungufyllingum. Þessu fyrirbrigði lýsti Guðmundur Ómar fyrst í doktorsritgerð sinni (Guðmundur Ómar Friðleiffson 1983). Þessi auðsjáanlega hliðrun bergbrota, sem verður við útfellingu kalsítsins, gæti bent til öflugrar suðu. Við suðu verður rúmmálsbreyting vökvans mikil, og hún leysir úr læðingi orku sem getur haft í för með sér sprungumyndun í bergi. Ef gufuþrýstingur fer yfir fargþrýsting þá getur það leitt til gufusprengigíga. Ef hann er lægri hefur gufumyndunin lítil áhrif, nema að fyrir sé opning í berginu svo gufuþrýstingurinn getur fært bergbrotið til. Ef svo er, merkir það að opningar eru í berginu áður en suðan verður. Líklegt er að um leið og vatnsfasinn inni í berginu breytist í gufu opnast sprungan, þangað flæðir inn vökvi hungraður í Ca og fellir út kalsít um leið og sú jón er gómuð. Oftar en ekki sjást vísbendingar um útfellingu pýríts, þótt játa verði að ekki hefur verið nægilega kerfisbundið athugað hvort pýrítið hafi fallið út samhliða kalsítinu eða á öðrum tíma. Þarna eru því ákveðnar vísbendingar um að þessi

sérstæða hegðun kalsíts bendi til kröftugrar suðu. Sú spurning vaknar hvert stöðugleikasvið steinda eins og plagíóklas og pýroxen sé við slíkar aðstæður. Ef horft er á þessar steindir við hita yfir 200°C, er vitað að þær eru óstöðugar og hefur plagíóklas tilhneigingu til að losa sig við Ca og mynda Na-feldspatinn albít. Plagíóklasdýlar í bergi eru enn óstöðugari en grunnmassaplágíóklasinn þar sem sá fyrrnefndi er Ca-ríkari. (Sigurður Gíslason og Stefán Arnórsson 1990). Á sama hátt hefur pýroxen tilhneigingu til að brotna niður, t.d. í leir. Báðar steindir virðast því vera nærri stöðugleikamörkum þegar karbónatíð heimtar sitt Ca.

Zeólítar eru einkennissteindir í lághitakerfum. Á tertíerum svæðum mynda þeir belti sem lýsa auknum hita með dýpi, og það sem er sérstakt að samband er á milli zeólítategunda og efnasamsetningar basaltsins (Walker 1960). Í feltvinnu vegna gulleitar á Austurlandi 1997, kom í ljós enn ákveðnara samband á milli ummyndunar og berggerðar, því að jaspis og (lág hita)kvars eru mjög ráðandi við þunn súr berglög (t.d. ignimbrít) inn í miðjum basaltstafla, og höfðu þessi lög að því er virtist ekkert smitað nágrennið með kísilríkari steindum. Þetta sterka samband á milli ummyndunar og efnasamsetningar bergsins bendir eindregið til að þrátt fyrir háan poruhluta í lág hitasvæðum, þá er vatnið sem þar er í eðli sínu hreyfingarlaust ('stagnant'). Kalsít og pýrít eru mun sjaldgæfari steindir í lág hita umhverfi en í há hitakerfum, og enn sjaldgæfara að sjá þær steindir í sambúð. Í felti virðist kalsít oft tengjast sprungum. Kalsít eykst í bergi er nær dregur jöðrum há hitakerfa, og er áhugavert að minnst þess að silfurbergsnámur eru einmitt við slíka jaðra (Hoffell, Helgustaðir). Við þær aðstæður er aragonít einnig algengt. Pýrít aftur á móti er ekki eins algengt, og er sennilega sjaldan tengt útfellingu kalsíts.

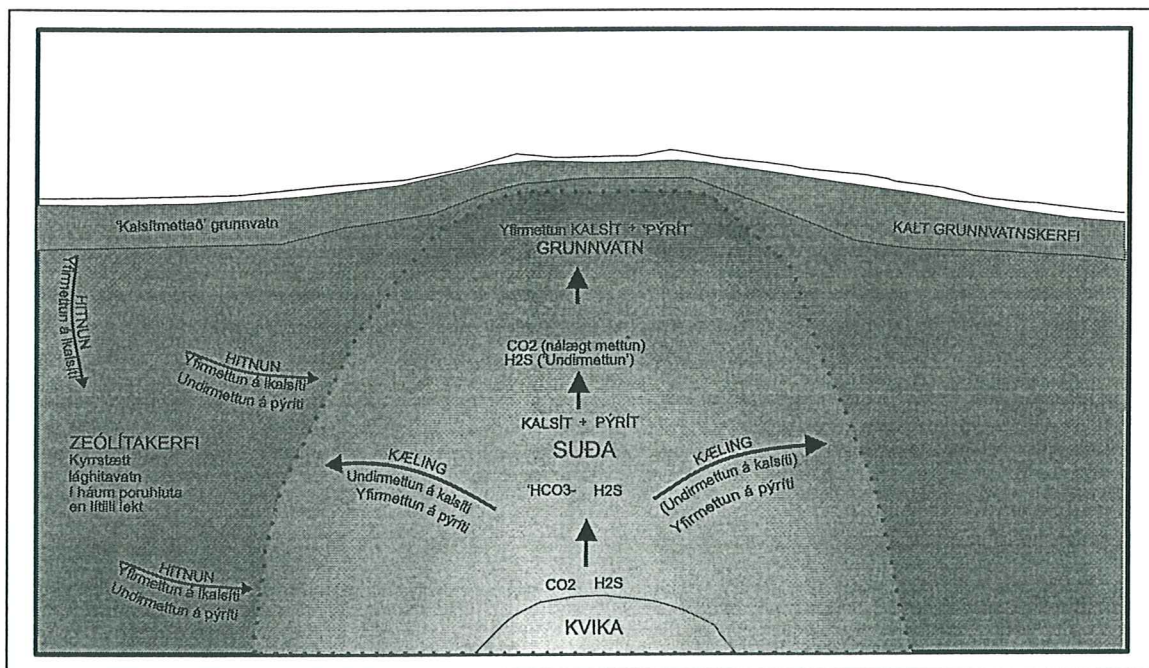
#### 4. Umræða

Þessar hugleiðingar hófust á því að sýna graf þar sem att er saman brennisteini og CO<sub>2</sub>, og bent á að í meirihluta sýnanna var annað hvort CO<sub>2</sub> í sýninu eða brennisteinn, en aðeins í sumum sýnanna var hvorutveggja til staðar. Í síðarnefnda tilvikinu er á grundvelli efnagreininga ekki hægt að slá því föstu að brennisteinninn (pýrítíð) og kalsítíð (CO<sub>2</sub>) hafi fallið út á sama tíma. Slíkt gæti þunnarnefndagreining sagt til um. Í greinum Stefáns Arnórssonar (1989, 1995) leiðir hann getum að því að ástæða mikils magns kalsíts og pýríts sé vísbending um suðu í jarðhitakerfi, svo sem í Svartsengi, Reykjanesi og Kröflu. Mögulega er þetta rétt, en eingögnu væri unnt að sýna fram á þetta, ef pýrít og kalsít hafa fallið út á sama tíma ásamt því að kalsítumyndun verður í berginu, og einnig ef að unnt væri að sýna fram á slíkt með vökvabóluathugunum.

Höfundur telur allt eins líklegt að kalsít sem finnst í há hitakerfum sé, alla vega að hluta til vísbending um kólnun. Með kólnun er átt við að kaldara vatn streymi inn í heitari kjarna há hitakerfisins. Á Nesjavöllum er kalsít ein af síðustu útfellingafösum í jarðhitakerfinu, og sýnt hefur verið fram á að á þeim tíma sem það er að falla út verður kólnun í kerfinu (Hjalti Franzson 1994). Þessar niðurstöður eru studdar vökvabóluathugunum. Í Svartsengiskerfinu er kalsít algeng steind og hefur fallið seint út í holrými (Hjalti Franzson 1983), og þar hafa vökvabólur sýnt að kerfið hefur líklegast ekki náð suðu nema ef til vill á milli 400-600 m dýpis, en einnig það að kerfið er þar að kólna og verða saltara (Hjalti Franzson 1995). Í síðustu holunni, SJ-18, er ummyndun há þar sem wollastonít, granat og fleiri steindir finnast án þess að kalsít sé þar. Vísbendingar eru um að lekt í þeirri holu tengist beltum þar sem kalsít hefur fallið út. Þetta umhverfi finnst mér vera vísbending um kólnun. Kalsít er mjög algengt í efra kerfinu í Kröflu, og eru vísbendingar um að það sé einna síðast að falla út í jarðhitakerfinu (t.d. Amir Tamjidi 1997). Munur á ummyndunarhita og berghita bendir eindregið til að kæling hafi átt sér stað í jarðhitakerfinu. Ekki er ósennilegt að hluti af því

kalsíti geti verið tengdur þessari kælingu. Gögn úr holunni á Ölkelduhálsi eru með öðrum hætti (Benedikt S. Steingrímsson o.fl. 1997). Kalsít er þar mjög algeng steind, bæði sem sprungufyllingar og sem veggummyndun, og einnig virðist sem pýrít tengist útfellingu kalsíts. Vökvabólur sýna að kalsít hefur myndast á við suðu. Sú kæling, sem Ölkelduhálskerfið í nágrenni ÖJ-1 hefur átt við að stríða, sést ekki í ummynduninni.

Á mynd 3 er sýndur einfaldaður þverskurður af háhitakerfi og umhverfi þess, og síðan sýnt hvernig höfundur hugsar sér kalsít og pýrít útfellingar í kerfinu sem orsakast annað hvort af kælingu í jarðhitakerfinu eða af suðu innan jarðhitakerfisins.



Mynd 3. Einfaldaður þverskurður af háhitakerfi og umhverfi þess og útfelling kalsíts og pýríts.

## 5. Helstu niðurstöður

Helstu niðurstöður þessara hugleiðinga um kalsít og pýrít eru eftirfarandi:

- Kalsít er merki um lekt.
- Kalsít myndast við upphitun grunnvatns (kælingu á bergi) og við suðu í jarðhitakerfi. Pýrít er líklegur fylgifyllingur kalsítútfellinga í síðara tilvikinu.
- Sú tilgáta er sett fram að kalsít á lágheatavæðum og við jaðra háhitakerfa hafi fallið út við flæði kaldara vatns inn í heitara berg (bergkælingu).
- Önnur tilgáta er að mikil kalsítummyndun bergs við sprungujaðra, ítrodsla kalsíts inn á milli steindalaga í holu-/sprungufyllingum, ásamt pýrítútfellingum sé vísbending um öfluga suðu í jarðhitakerfi. Lagt er til að þessi atriði verði kerfisbundið athuguð í framtíðinni, bæði í kjörnum og svarfi, til að staðfesta hvort staðsetja megi á þann hátt suðubelti eða kælingu á grundvelli hegðunar kalsíts í berginu.
- Náði samband útfellinga við það móðurberg sem þær falla út í bendir eindregið til að zeólítabelti í gosbeltinu utan háhitakerfa sé merki um 'stagnant' vatnskerfi, þrátt fyrir háan poruhluta. Kalsít í slíku umhverfi er líklega merki um niðurstreymi kaldara grunnvatns.

- Sú tilgáta er sett fram að a.m.k. hluti þess kalsíts, sem finnst í Svartsengis-, Nesjavalla- og jafnvel Kröflukerfinu (efra kerfið), sé vísbending um kælingu.

### Heimildir

*Amir Tamjidi* 1997. Borehole geology and hydrothermal alteration of well KJ-29 in the Krafla high-temperature area, NE-Iceland. UNU-Geothermal Training Programme, report 14, p.339-368.

*Ásgrímur Guðmundsson, Hjalti Franzson, Guðmundur Ómar Friðleifsson* 1995. Forðafræðistuðlar. Söfnun sýna. Áfangaskýrsla um samvinnuverk Hitaveitu Reykjavíkur, Hitaveitu Suðurnesja og Orkustofnunar. 72 s.

*Benedikt S. Steingrímsson Helga Tulinius, Hjalti Franzson, Ómar Sigurðsson, einar Gunnlaugsson og Gestur Gíslason* 1997. Ölkelduháls Hóla ÖJ-1. Borun, rannsóknir og vinnslueiginleikar. Unnið fyrir Hitaveitu Reykjavíkur. OS-97019. 190 s.

*Guðmundur Ómar Friðleifsson* 1983. The geology and the alteration history of the Geitafell central volcano, Southeast Iceland. PhD-thesis Edinburgh University, 371p.

*Hjalti Franzson* 1994. Nesjavellir. Þættir af ummyndun í jarðhitakerfi. Samvinnuverk Orkustofnunar og Hitaveitu Reykjavíkur. OS-94021/JHD-06. 52 s.

*Hjalti Franzson* 1995. Geological aspects of the Svartsengi high-T field, Reykjanes peninsula, Iceland. Water-Rock Interaction, ed. Kharaka & Chudaev. p.497-500

*Hjalti Franzson* 1998a. Forðafræðistuðlar. Efnagreiningar á bergi 1997. Greinargerð HF-98-04. 7s.

*Hjalti Franzson* 1998b. Forðafræðistuðlar. Tengsl efnagreinds CO<sub>2</sub>, kalsíts og bundins vatns. Greinargerð HF-98/04. 11s.

*Hjalti Franzson, Guðmundur Ómar Friðleifsson, Ásgrímur Guðmundsson og Elsa G. Vilmundardóttir* 1997. Forðafræðistuðlar. Staða bergfræðirannsókna í lok 1997. Áfangaskýrsla um samvinnuverk Hitaveitu Reykjavíkur og Orkustofnunar. 57s.

*Sigurður Gíslason og Stefán Arnórsson* 1990. Saturation state of natural waters in Iceland relative to primary and secondary minerals in basalts. Fluid-Mineral Interactions: A tribute to H. H. Eugster. The Geochemical Society. Special publication No. 2. p.373-393.

*Stefán Arnórsson* 1989. Deposition of calcium carbonate minerals from geothermal waters - theoretical considerations. *Geothermics*, **18**, No.1/2 pp. 33-39.

*Stefán Arnórsson* 1995. Geothermal systems in Iceland: Structure and conceptual models - I. High-temperature areas. *Geothermics* **24** No. 5/6, pp.561-602.

*Walker G.P.L* 1960. Zeolite zones and dyke distribution in relation to the structure of the basalts of eastern Iceland. *J. Geol.* **68**, pp.515-528.