



ORKUSTOFNUN

RANNSÓKNASVIÐ - Reykjavík, Akureyri

Útfellingar í holu 9 Reykjanesi

Vigdís Harðardóttir

Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja

2002

OS-2002/011

Vidgís Harðardóttir

Útfellingar í holu 9, Reykjanesi

Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja

OS-2002/011

Febrúar 2002

ISBN 9979-68-091-1

ORKUSTOFNUN – RANNSÓKNASVIÐ

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

Akureyri: Háskólinn á Akureyri, Sólborg v. Norðurslóð, 600 Ak.

Sími: 463 0559 – Fax: 463 0560

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

Skýrsla nr.: OS-2002/011	Dags.: Febrúar 2002	Dreifing: <input checked="" type="checkbox"/> Opin <input type="checkbox"/> Lokuð til
Heiti skýrslu / Aðal- og undirtitill: ÚTFELLINGAR Í HOLU 9, REYKJANESI		Upplag: 30
		Fjöldi síðna: 48
Höfundar: Vigdís Harðardóttir		Verkefnisstjóri: Sverrir Þórhallsson
Gerð skýrslu / Verkstig: Greining útfellinga, samantekt		Verknúmer: 8-630252
Unnið fyrir: Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja		
Samvinnuaðilar:		
Útdráttur: <p>Í skýrslunni eru dregnar saman helstu upplýsingar um holur 8 og 9 á Reykjanesi. Rakin er vinnslusaga þeirra og gerð úttekt á greiningum á útfellingunum úr holu 8 og frá leiðslum úr holu 9. Helstu niðurstöður eru: Djúpvökvi í holum 8 og 9 er mjög svipaður, efnastyrkur nær hinn sami en djúphiti er um 275°C í holu 8 en 290°C í holu 9. Útfellingar í leiðslum á yfirborði frá báðum holunum eru svipaðar. Útfellingar frá holu 9 er að finna frá skiljustöð og trúlega að suðuborði. Mest fellur út strax eftir blendu en minnkar svo er fjær dregur. Þetta er að mestu ókristallaður kísill og járnslíköt, sem eru allt að 85% massans, svo og súlfíð, aðallega sinkblendur (ZnS), blýglans (PbS) og eirkís (CuFeS₂), eða blöndur af þessum steindum. Mjög líklega falla steindir út við suðu sem getur hafist á um 1000 m dýpi sé aflið um 80 kg/s og holutoppþrýstingur um 30 bar-a, en suðuborð verður á um 670 m, sé aflið 30 kg/s og holutoppþrýstingurinn hafður 43 bar-a. Nær enginn kísill fellur út fyrir blendu, en strax eftir blendu eykst hann í 47% og er komin í 82% 30 m frá og fer hæst í 93% um 70 m frá blendu. Málma eins og gull, silfur, kopar og sink er að finna í þó nokkru magni. Nauðsynlegt er að greina snefilefni í borholuvökvanum auk aðalefna. Samantektin er unnin samkvæmt samningi við Hitaveitu Suðurnesja.</p>		
Lykilorð: Háhati, borholur, vinnsla, útfellingar, snefilefni, líkanreikningar, Reykjanes	ISBN-númer: 9979-68-091-1	
	Undirskrift verkefnisstjóra:	
	Yfirfarið af: HK, JÖB, HÁ	

EFNISYFIRLIT

1. INNGANGUR.....	7
2. JARÐSJÓRINN Á REYKJANESI.....	8
3. REYKJANES	13
3.1. Vinnslusaga holu 8	13
3.1.1. Vinnslusaga holu 9	13
3.2. Útfellingar úr holu 8	17
3.3. Útfellingar úr holu 9	18
3.3.1. Rafeindasmásjá og örgreining	29
3.3.2. Aðal- og snefilefnagreining	31
3.3.3. Líkanreikningar	36
4. ÖNNUR SVÆÐI.....	39
4.1. Salton Sea jarðhitasvæðið	39
4.2. Fushime jarðhitasvæðið.....	40
5. FRAMHALDSRANNSÓKNIR	41
6. SAMANTEKT	42
7. HEIMILDIR	44

TÖFLUR

Tafla 1. <i>Yfirlit um boranir á jarðhitasvæðinu Reykjanesi frá 1956.</i>	8
Tafla 2. <i>Reykjanes, styrkur efna í ppm (mg/kg) í djúpvatni í holum 8 og 9</i>	10
Tafla 3. <i>Helstu breytingar sem orðið hafa á vinnslu holu 9 Reykjanesi á tímabilinu 1983–1999.</i>	16
Tafla 4. <i>Hola 8, Reykjanesi. Útfellingar og kísilmagn.</i>	17
Tafla 5. <i>Örgreiningar af ljósa massanum í útfellingum úr holu 8, Reykjanesi.</i>	17
Tafla 6. <i>Efnagreining á útfellingum úr holum 8 og 9, Reykjanesi.</i>	18
Tafla 7. <i>Hola 9, Reykjanesi, niðurstöður efnagreininga á svartri útfellingu.</i>	19
Tafla 8. <i>Hola 9, Reykjanesi, útfellingar.</i>	20
Tafla 9. <i>Hola 9, Reykjanesi, útfellingar, niðurstöður XRD greininga frá 1985, 1992 og 1993.</i>	20
Tafla 10. <i>Hola 9, Reykjanesi, útfellingar, niðurstöður úr XRD keyrslu.</i>	21
Tafla 11. <i>Niðurstöður XRD greininga frá hreinsun holu 9 Reykjanesi júlí 2000.</i>	28
Tafla 12. <i>Hola 9 Reykjanesi, útfellingar við skiljustöð, niðurstöður úr XRD greiningu frá 2002.</i>	29
Tafla 13. <i>Hola 9 Reykjanesi, útfellingar úr holutoppi og af 0 til 530 m dýpi, niðurstöður úr XRD greiningu frá 2001.</i>	29
Tafla 14. <i>Nöfn algengustu steindanna sem nefndar eru í greininni og efnafræðiformúlur þeirra.</i>	29
Tafla 15. <i>Örgreiningar (SEM) sinkblendis og eirkíss úr leiðslu frá holu 9, Reykjanesi.</i>	30
Tafla 16. <i>Örgreiningar (EPM) af útfellingu nr. 22, fyrir blendu, holu 9 Reykjanesi.</i> ...	31
Tafla 17. <i>Niðurstöður greininga á aðalefnum (þunga- %) í útfellingum úr holum 8 og 9, Reykjanesi.</i>	33
Tafla 18. <i>Niðurstöður snefilefnagreininga á útfellingum úr holu 9 og úr leiðslum þaðan og úr holu 8 Reykjanesi.</i>	35
Tafla 19. <i>Útreiknuð gildi á suðuborði við ákveðinn þrýsting og afl.</i>	36

MYNDIR

Mynd 1. Einfaldað jarðlagasnið af jarðhitasvæðinu Reykjanesi, sýndar eru jafnhitalínur og rennslisleiðir..	9
Mynd 2. Breytingar í styrk kísils með tíma í holum 8 og 9 Reykjanesi.	10
Mynd 3. Breytingar í styrk uppleystra efna með tíma í holum 8 og 9 Reykjanesi.	11
Mynd 4. Breytingar í styrk klóríðs með tíma í holum 8 og 9 Reykjanesi.	11
Mynd 5. Breytingar í styrk natríums með tíma í holum 8 og 9 Reykjanesi.	11
Mynd 6. Breytingar í styrk kalís með tíma í holum 8 og 9 Reykjanesi.	12
Mynd 7. Breytingar í styrk magnesíums með tíma í holum 8 og 9 Reykjanesi.	12
Mynd 8. Breytingar í styrk kalsíums með tíma í holum 8 og 9 Reykjanesi.	12
Mynd 9. Vinnsla, þrýstingur og blendustærð frá holu 9, Reykjanesi við 1983 til 1998.	14
Mynd 10. Horft yfir leiðslur frá holu 9, Reykjanesi.	23
Mynd 11. Mynd tekin fyrir blendu af um 5 mm þykkum útfellingum; aðallega blýglans, eirkís og leir, vottur af pyrrhotíti.	24
Mynd 12. Útfellingar í leiðslum frá holu 9 Reykjanesi	24
Mynd 13. Útfellingar í leiðslum frá holu 9 Reykjanesi.	25
Mynd 14. Útfelling nr. 40 (tafla 11) úr leiðslu frá holu 9 Reykjanesi.	25
Mynd 15. Útfellingar, 3-6 cm þykkar, í leiðslum frá holu 9 Reykjanesi	26
Mynd 16. Útfellingar við skiljustöð, sjólögn frá jöfnunargeymi	26
Mynd 17. Útfelling í sjólögn við tank við skiljustöð, rennslisop 22 sm.	27
Mynd 18. “Backscatter” mynd tekin í rafeindasmásjá af 5 mm þykkri útfellingu úr holu 9 Reykjanesi.	30
Mynd 19. Dreifing kísils úr holu 9 Reykjanesi frá holutoppi að skiljustöð	32
Mynd 20. Dreifing nokkurra frumefna úr holu 9 Reykjanesi frá holutoppi að skiljustöð.	32
Mynd 21. Dreifing Co, Ta, W og Ni úr holu 9 Reykjanesi frá holutoppi að skiljustöð.	33
Mynd 22. Dreifing Au, Ag, Cd, Se og Ba úr holu 9 Reykjanesi frá holutoppi að skiljustöð	34
Mynd 23. Dreifing Sr, As og Rb úr holu 9 Reykjanesi frá holutoppi að skiljustöð.	34
Mynd 24. Mettun ýmissa steinda í vökva frá holu 9 við suðu í þrepum frá 300°C niður í 170°C, gufa ekki skilin frá.	37
Mynd 25. Mettun ýmissa steinda í vökva frá holu 9 við suðu í þrepum frá 300°C niður í 170°C, gufa skilin frá.	37

1. INNGANGUR

Reykjanes er annað af tveimur öflugum háhitasvæðum á Reykjaneskaga sem eru nýtt. Hitt er Svartsengi. Rannsóknir hafa staðið yfir í tæp 50 ár á Reykjanesi. Árið 1956 stóð Raforkumálaskrifstofan fyrir borun til að rannsaka saltvatn í hverum á Reykjanesi. Baldur Líndal stjórnaði verkinu og var það upphaf mikilla rannsókna og borana á þessu svæði. Viðamesta rannsókn sem gerð hefur verið á svæðinu í heild var framkvæmd á tímabilinu 1968 til 1970 og birt í skýrslu sem Sveinbjörn Björnsson ritstýrði (Sveinbjörn Björnsson o.fl. 1971). Þar voru teknar fyrir frumrannsóknir og djúprannsóknir í jarðfræði, jarðeðlisfræði og efnafræði. Seinni tíma rannsóknir hafa einkum beinst að nýtingu jarðsjávarins og þar af leiðandi hafa rannsóknir á efnafræði grunnvatns og jarðhitavökva aukist allverulega. Rannsóknirnar sýndu að jarðhitasvæðið væri um 8 km² að flatarmáli en merki jarðhitans á yfirborði eru aðeins um 1 km² og hafa nýlegar TEM-viðnámsmælingar staðfest að stærð svæðisins sé um 10 km² (Sveinbjörn Björnsson 1971; Ragna Karlsdóttir 1997).

Boraðar hafa verið 10 holur (tafla 1). Fyrstu sjö holurnar voru tilraunaborholur, en þrjár síðustu eru vinnsluholur. Hóla 8 var boruð 1969, hóla 9 1983 og borun síðustu holunnar lauk í febrúar 1999 (tafla 1). Holur 8 og 9 eru mjög afkastamiklar og hafa verið notaðar til saltvinnslu og raforkuvinnslu í smáum stíl.

Hæsti hiti sem mælst hefur á svæðinu er yfir 310°C í holu 10. Í júlí 2000 fór fram mikil hreinsun á leiðslum frá holu 9 að skiljustöð og þaðan að hljóðdeyfihúsi. Verkið var unnið með háþrýstipvotti og tók um 4 vikur og voru allmargir rúmmetrar af útfellingum fjarlægðir (Árni Einarsson, munnl. heimildir). Tekin voru um 30 útfellingasýni meðan á hreinsuninni stóð, aðallega frá blendu og næstu 150 m þaðan í frá. Einnig voru nokkur sýni tekin niðri við skiljustöð. Hluti rannsóknanna hefur þegar verið birtur á WRI-10 ráðstefnu í Villasimius, Ítalíu og á Orkuþingi 2001 (Harðardóttir et al. 2001; Vigdís Harðardóttir o.fl. 2001).

Tilgangur þessarar skýrslu er tvíþættur. Í fyrsta lagi að taka saman heimildir um holu 9 Reykjanesi, rekja sögu holunnar, skilgreina vandamál vinnslu og afmarka þann vinnsluþrýsting, sem unnt er að reka holuna við án þess að til mikilla útfellinga komi, og jafnframt að gera samanburð við önnur svæði með svipuð vandamál. Í öðru lagi að leita orsaka þess að útfellingar verða og við hvaða aðstæður og bera saman við holu 8.

Tafla 1. Yfirlit um boranir á jarðhitasvæðinu Reykjanesi frá 1956.

Hola	1	2	3	4	5	6	7	8 ¹⁾	9	10
Borun (ár)	1956	1968	1968	1969	1969	1969	1969	1969	1983	1999
Dýpi í m	162	301	1166	1036	112	572	73	1754	1445	2054
Fóðring	12 m	10 ", 6 " í 301 m	13 ³ / ₈ " 9 ⁵ / ₈ " í 242 m	13 ³ / ₈ ", 9 ⁵ / ₈ í 245 m	14 " í 40,5 m	10 ", 5" í 222 m	10 ", 8" í 38 m	13 ³ / ₈ " í 88,5 m, 9 ⁵ / ₈ " í 297m, 7 ⁷ / ₈ " raufaður leiðari á köflum í 1685 m	13 ³ / ₈ " í 525 m, 9 ⁵ / ₈ " raufað í 1414 m*	699 - raufað í 2030 m
Hæstur hiti (°C)	185	200	270	240	30	<50	14	290	295	312
Tegund holu	rannsóknarholur							vinnsluholur		

1) Steypt í holuna 1993. * Raufar: 25 x 100 mm, 4 raufar á hring með 16 sm millibili frá 550 m.

2. JARÐSJÓRINN Á REYKJANESI

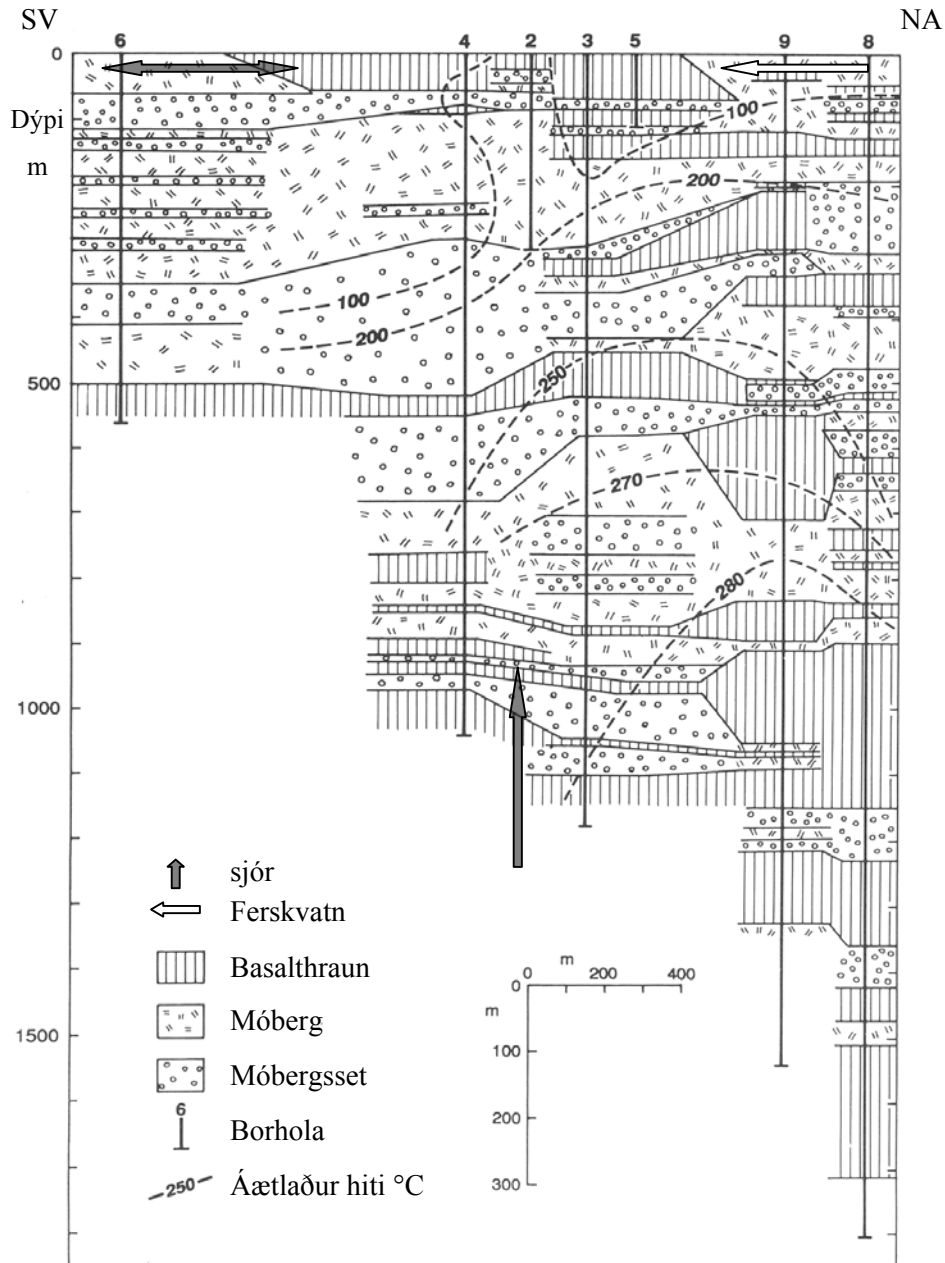
Hverasvæðið á Reykjanesi er eitt af betur rannsökuðum háhitasvæðum landsins og nær saga rannsókna allt aftur til ársins 1851 (Kristján Sæmundsson 1997). Borun og rannsóknir tengdar þeim hófust árið 1956 og í janúar 1970 var komið fram það hugmyndalíkan af svæðinu, sem síðan hefur verið stuðst við og sýnt er á mynd 1. Jarðlagaskipan á svæðinu er þannig að efstu 100–200 m eru aðallega hraun, þá tekur við að mestum hluta móbergs- og setmyndun niður í 900 m. Blágrýtis- og setummyndun er neðan 900 m. Grunnvatn er að mestu ferskt í efstu 50 m en þar fyrir neðan er kaldur sjór (Sveinbjörn Björnsson o. fl. 1971; Tómasson og Kristmannsdóttir 1972; Trausti Hauksson 1981).

Jarðsjórinn í holum 8 og 9 hefur verið talinn að uppruna sjór (Tómasson og Kristmannsdóttir 1972; Trausti Hauksson 1981; Jón Örn Bjarnason 1984), en frábrugðinn samsetningu fersks sjávar að því leyti, að þegar jarðsjórinn hitnar hvarfast hann við bergið í kring þannig að súlfat (SO_4^{2-}) og magnesíum (Mg^{2+}) hverfa að miklu leyti, en kísill (SiO_2), kalíum (K^+) og kalsíum (Ca^{2+}) aukast. Helsta skýringin á þessum mun efnastyrks er, að anhýdrít (CaSO_4) og magnesíumsteindir hafi fallið út í berginu, sem sjórinn á greiðan aðgang að, og að sjórinn hafi leyst upp kalíum og kalsíum úr berginu (Ellis og Mahon 1977). Rannsóknunum á efnafræði jarðhitavökvans úr holum 2 og 8 og hverum hafa einnig verið gerð góð skil í grein eftir Ólafsson og Riley (1978). Niðurstaða þeirrar greinar var að jarðhitavökvinn sé regnvatn og sjór, sem hvarfast hefur við basalt og fylgt eftir með gufun ofarlega í jarðhitakerfinu.

Meðan holur 8 og 9 blésu var fylgst reglulega með efnastyrk í vinnsluvatni og gufu úr holunum (Traust Hauksson 1981; Jón Örn Bjarnason 1984, 1987, 1998) og er samsetning djúpvatns reiknuð á grundvelli efnagreininga nokkurra valinna sýna sem skráð eru í töflu 2. Þar sem sýnum er safnað við mismunandi þrýsting, og hlutföll vatns og gufu eru breytileg frá einni sýnatöku til annarrar, er hér valinn sá kostur að sýna djúpvatnssamsetningu fremur en hráar efnagreiningar. Djúpvökvinn í holu 9 hefur verið mjög stöðugur í gegnum árin og hitastigið lítið breyst (Jón Örn Bjarnason 1998, 2002). Þetta er sýnt á myndum 2, 3, 4, 5, 6, 7 og 8, en þar er sýndur styrkur helstu efna í

jarðsjónum svo og úr holu 8 til samanburðar. Nokkrar sveiflur hafa verið í gasmagni í holu 9 en þar er koltvíoxíð (CO_2) aðalgastegundin. Brennisteinsvetni (H_2S) er hin aðalgastegundin en styrkur þess er frekar lágur miðað við önnur jarðhitasvæði.

Sé borinn saman efnastyrkur rennis holna 8 og 9 er ekki mikill munur á þeim ef undan er skilinn styrkur kísils, sem er aðeins meiri í vökva holu 9, en magnesíumstyrkurinn er eilítið eitt minni. Hvort tveggja er eðlileg afleiðing hærra hitastigs í holu 9. Eins og sjá má eru aðeins aðalefnin greind, en aðeins eru fáein ár síðan byrjað var að greina járn reglulega. Snefilefni eins og sink (Zn), blý (Pb), kopar (Cu), strontíum (Sr), tin (Sn), mangan (Mn) og litíum (Li) eru ekki greind að jafnaði.

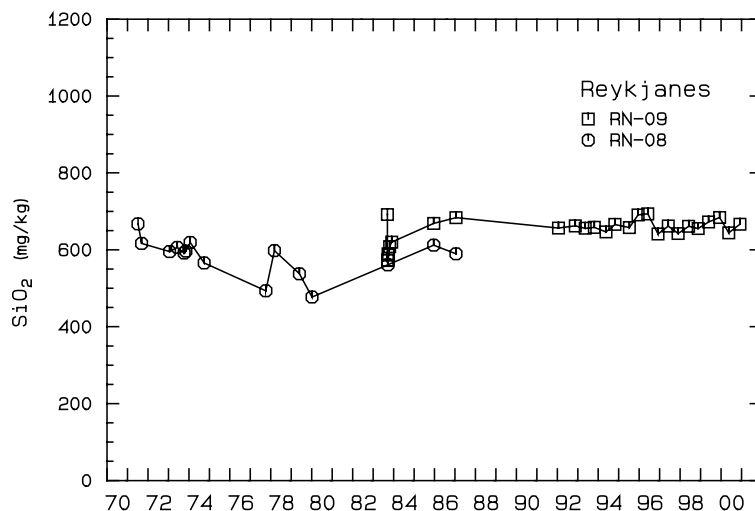


Mynd 1. Einfaldað jarðlagasnið af jarðhitasvæðinu Reykjanesi, sýndar eru jafnhitalínur og rennislísiðir. (Sveinbjörn Björnsson o.fl. 1971; Tómasson og Kristmannsdóttir 1972; Trausti Hauksson 1981; Lonker o.fl. 1993).

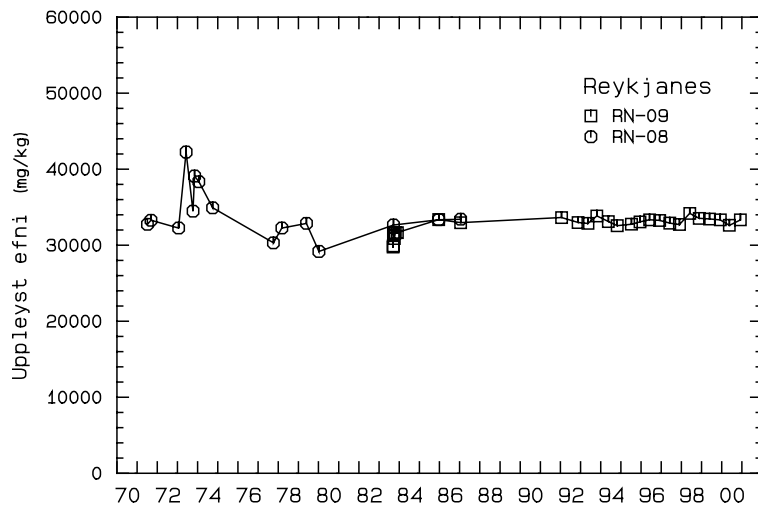
Tafla 2. Reykjanes, styrkur efna í ppm (mg/kg) í djúpvatni í holum 8 og 9. Einnig er sýndur styrkur efna í sjó við Reykjanes og í borholuvökum í Salton Sea jarðhitasvæðinu í Kaliforníu, USA og í vökva úr borholu í Fushime jarðhitasvæðinu í Japan.

Hola Sýni nr.	Reykjanes						sjór ⁴	Salton Sea ⁵	Fushime SKG-9 ⁶
	8 ¹	8 ²	8 ³	9 830289	9 920290	9 940057			
°C	157	270	275	290	290	290			
SiO ₂	666	588	553	611	653	638	3	405	905
Na	8987	9520	9488	8873	9602	9651	10520	43200	10100
K	1405	1380	1438	1525	1408	1381	416	10600	2090
Ca	1588	1580	1591	1460	1669	1594	386	20200	1300
Mg	6,93	1,43	1,28	0,902	0,910	0,992	1282	90	2,9
SO ₄	1,72	40,8	21,8	20,5	15,5	20,0	2640		28
Cl	17688	19200	18732	18516	18479	19302	19800	122000	20700
F	0,10	0,15	0,17	0,16	0,15	0,17			3,2
Al	u.n.				0,067	0,073			
Fe	*				0,17	0,24		320	1,8
Zn	0,07							250	0,036
Pb					0,002**			50	0,006
Sr	6,3							330	
B	8,0				7,8	7,7		222	44
Mn	1,84				2,48	4,1		650	
Li	4,65							120	
NH ₃	1,4				0,0**			350	
Rb	3,70							50	
Cu	0,01							2	
Cr					0,002				
Uppl.		33300	32147	31644	32971	33097	35000	192000	
CO ₂		1930	1005	1380	1520	1260		6200	4533
H ₂ S		36,5	27	38,5	48,1	40,0		16	450
H ₂		0,24	0,08	0,038	0,353	0,070			3
CH ₄			0,09	0,029	0,064	0,051			15,7
N ₂			2,02	1,92	2,12	1,76			132

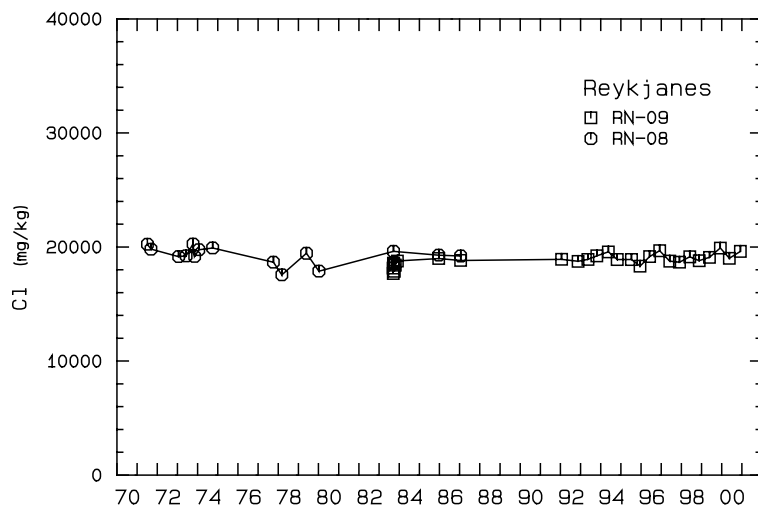
1) Frá Olafsson og Riley (1978), * tölur ekki áreiðanlegar vegna járn í fóðurrörum. 2) Meðalstyrkur, Trausti Hauksson (1981). 3) Meðaltal 4 greininga nr. 80-0001, 83-0233, 85-0378 og 87-0005 frá árunum 1980 til 1987. 4) Sveinbjörn Björnsson o.fl. (1971). 5) Gufa og vatn ekki reiknað í djúpvatn, pH=5,5, Gallup o.fl. (1990). 6) Gufa og vatn ekki reiknað saman í djúpvatn. Gufu safnað 16/10 1989 við 6,1 bar-a, vermi 1406 kJ/kg, vökva safnað 31/1 1990 við 1 bar-a, pH/hiti = 6,73/25, Akaku o.fl. (1991). U.n. = undir næmismörkum. ** úr gagnagrunni Orkustofnunar.



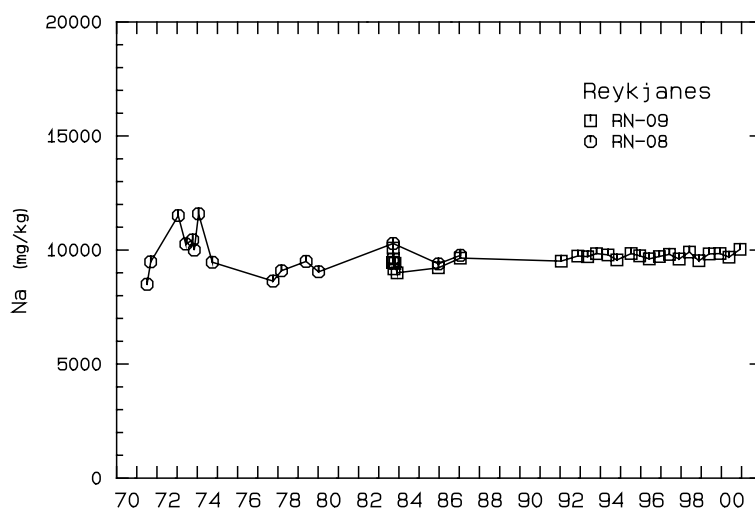
Mynd 2. Breytingar í styrk kísils með tíma í holum 8 og 9 Reykjanesi.



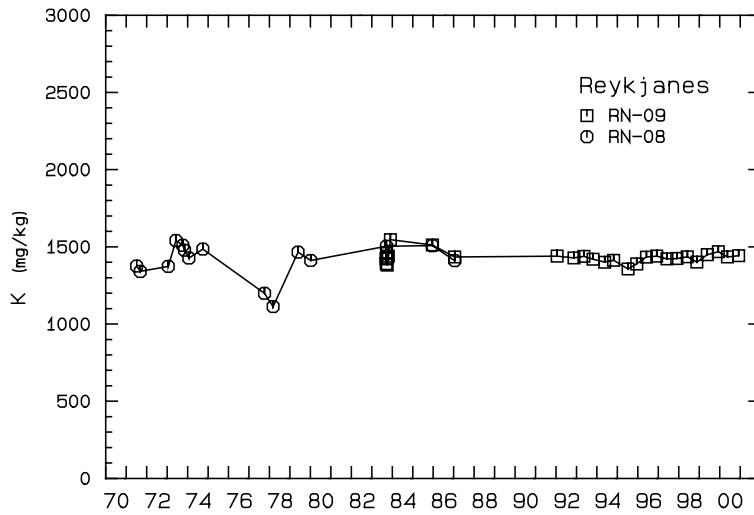
Mynd 3. Breytingar í styrk uppleystra efna með tíma í holum 8 og 9 Reykjanesi.



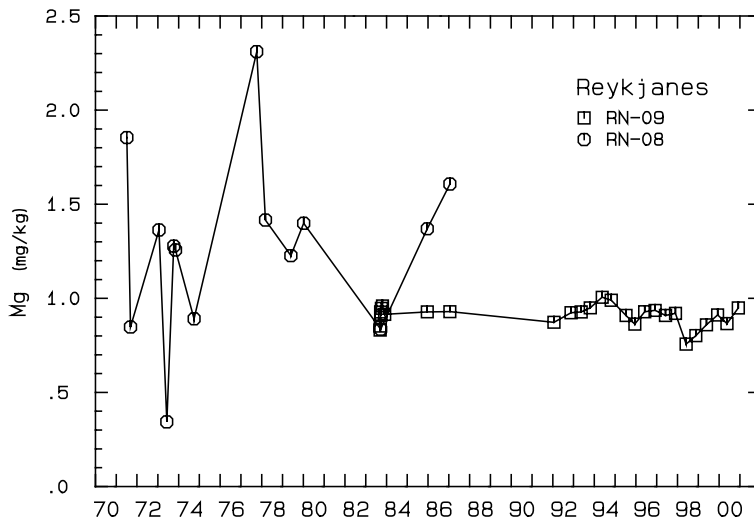
Mynd 4. Breytingar í styrk klóríðs með tíma í holum 8 og 9 Reykjanesi.



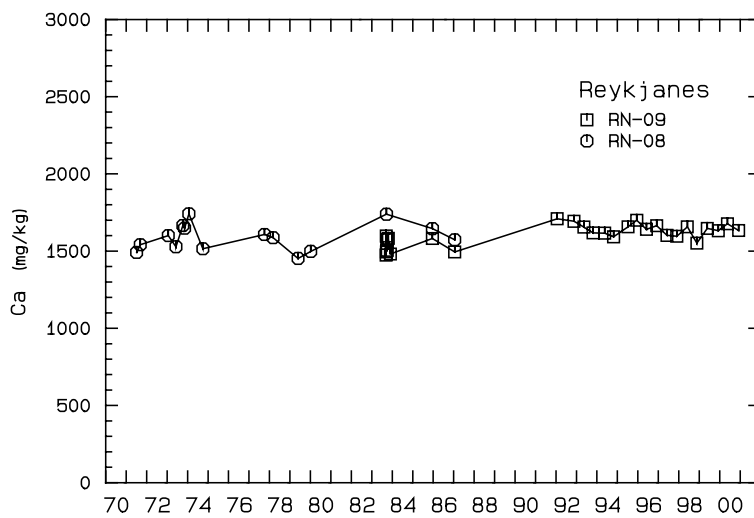
Mynd 5. Breytingar í styrk natríúms með tíma í holum 8 og 9 Reykjanesi.



Mynd 6. Breytingar í styrk kalís með tíma í holum 8 og 9 Reykjanesi.



Mynd 7. Breytingar í styrk magnesíums með tíma í holum 8 og 9 Reykjanesi.



Mynd 8. Breytingar í styrk kalsíums með tíma í holum 8 og 9 Reykjanesi.

3. REYKJANES

Í næstu köflum, 3.1. og 3.2., verður stuttlega greint frá vinnslusögu holna 8 og 9. Kaflar 3.3. og 3.4. fjalla um útfellingarnar í holunum en kaflar 3.4 skiptist í nokkra undirkafla þar sem fjallað er um þær rannsóknir sem gerðar hafa verið á útfellingunum í holu 9.

3.1. Vinnslusaga holu 8

Holan var boruð haustið 1969 í 1754 m dýpi. 9 5/8" steipt fóðring nær í 297 m. Á 260 m dýpi var hengdur 7 5/8" leiðari niður á 1685 m dýpi og var hann gataður á dýptarbilunum 984–1033 m, 1122–1307 m, 1485–1535 m og 1624–1685. Fóðringarskór var á 1685 m dýpi (Sverrir Þórhallsson, munnlegar upplýsingar). Hæstur hiti í holunni mældist 292°C á um 1700 m dýpi. Vatnsæðar var að finna á 390 m (3 l/s) og neðan 1000 m voru 8 æðar með 10–30 l/s og nokkrar smærri, alls um 120 l/s (Verkfræðistofan Vatnaskil hf. 1993a). Holan var í notkun til ársins 1974. Þá var henni lokað í nokkur ár en var síðan í vinnslu frá 1979 þangað til henni var lokað sumarið 1987 og var ekki í vinnslu eftir það (Sverrir Þórhallsson 1977; Verkfræðistofan Vatnaskil hf. 1993a og b).

Heildarafköst holunnar í upphafi mældust 85 kg/s (við 40 bar-a), en á árunum 1972–74 mældust þau 57 kg/s við 5,8 bar-a mótþrýsting á holutoppi. Holunni var lokað í október 1974 og stóð hún lokað fram á haust 1977. Afköst holunnar í október 1977 voru nánast óháð holutoppsþrýstingi, og benti það til þess að útfelling væri í holunni sem skammtaði rennslið. Undirbúningsfélagið að saltvinnslu lét þá koma holunni í blástur og afkastamæling sýndi 43 kg/s við 4 bar-a þrýsting. Við víddarmælingu kom í ljós að fyrirstöður voru í holunni á 257 m og 1370 m dýpi (Sverrir Þórhallsson 1977). Var holan hreinsuð í nóvember 1978 og sett í blástur í janúar 1979 og stóð svo til ársins 1987 er henni var lokað. Ákveðið var að taka holuna í notkun haustið 1993, en fyrst varð að kæfa hana og endurnýja allan toppbúnaðinn. Ekki gekk þetta eftir. Holan reyndist nánast fullstífluð af útfellingum, og auk þess var gat á vinnslufóðringunni á um 210–220 m dýpi og tapaðist ádælingarvatnið þar út. Í ljósi þessa var ákveðið að steypa í hana og loka henni þannig (Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson 1993).

3.1.1. Vinnslusaga holu 9

Hola 9 var boruð 1983 fyrir Sjóefnavinnsluna hf. í 1445 m dýpi, fóðruð með 13 3/8" í 525 m dýpi og frá 503 m dýpi og niður á botn með 9 5/8" raufluðum leiðara. Helstu vatnsæðar eru á 600–700 m dýpi og neðan 1300 m dýpis, þar sem gjöfulustu æðarnar er að finna (Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson 1992).

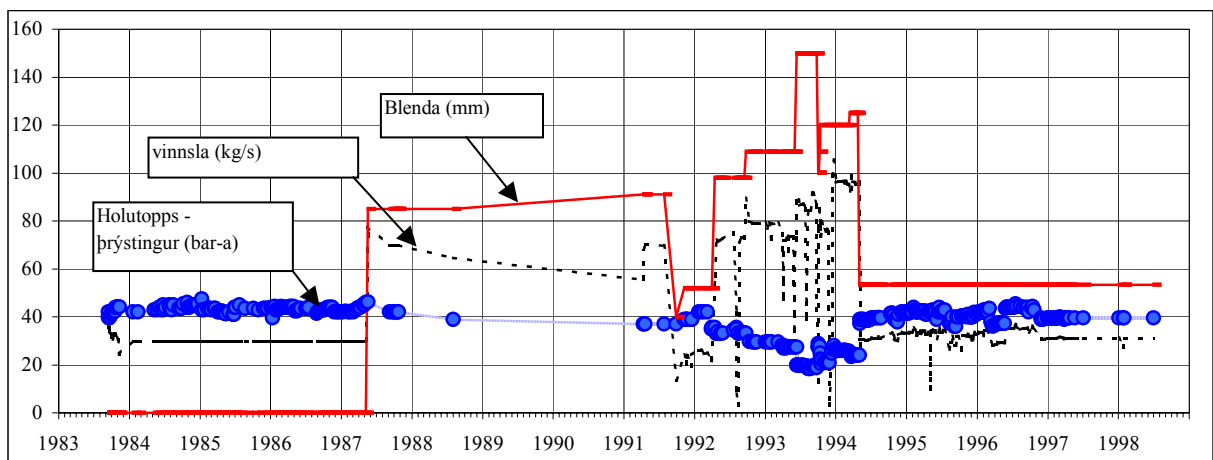
Holan var látin blása haustið 1983 og voru þá gerðar einu beinu afkastamælingarnar, sem til eru um heildarstreymi úr holunni við mismunandi mótþrýsting. Reglubundið eftirlit var tekið upp af Hitaveitu Suðurnesja í byrjun árs 1991 (Verkfræðistofan Vatnaskil hf. 1993a). Tafla 3 sýnir helstu breytingar sem hafa orðið á vinnslu holu 9 á tímabilinu 1983 til 2000.

Vinnslan var mjög stöðug fram á mitt sumar 1987, að meðaltali 30 kg/s við 40–44 bör (mynd 9). Á þessum tíma var "holan hreinsuð" fjórum sinnum og er þar líklega átt við að leiðslan frá blendu við holutopp sé hreinsuð og tvisvar var blendan hreinsuð.

Vorið 1987 var vinnslan aukin í u.þ.b. 70 kg/s með því að stækka blendu í 85 mm (tafla 3) og var toppþrýstingurinn þá um 42 bör. Ekki var farið að skrá stærð blendu fyrr en vorið 1987 eins og fram kemur á mynd 9.

Í apríl 1991 var blendustærðin aukin í 91 mm og við það lækkaði toppþrýstingurinn í 37 bör. Um haustið 1991 var blendan minnkuð í 40 mm. Toppþrýstingurinn reyndist svipaður en afköstin féllu í 13,5 kg/s. Blendustærðin var þá fljótlega aukin í 52 mm en afköstin voru aðeins á bilinu 20–25 kg/s.

Í mars 1992 var ástand holunnar kannað til að meta þær hita- og þrýstibreytingar, sem orðið höfðu í jarðhitakerfinu á Reykjanesi frá 1983. Helstu niðurstöður þessara mælinga voru eftirfarandi: “Lokunarþrýstingurinn er ekki eins hár og hefur verið. Engar fyrirstöður eða festur voru í holunni. Útfelling var í 2"-lögninni upp úr holutoppnum (líklega útfelling merkt 9204 og 9205 í töflu 9). Ekki var marktækur niðurdráttur við holuna frá 1983. Kæling var um 4–5 °C neðan 1000 m dýpis” (Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson 1992). Um miðjan apríl 1992 var blendan enn stækkuð upp í 98 mm og var þá toppþrýstingurinn um 33 bar.



Mynd 9. Vinnsla, þrýstingur og blendustærð frá holu 9, Reykjanesi við 1983 til 1998.

Í september 1993 var enn á ný skipt um blendu og hún stækkuð upp í 109 mm og lækkaði þá toppþrýstingurinn niður í um 30 bar. Á sama tíma var ákveðið að körfumæla holuna til að athuga hvort og þá hvar útfellingar væru í holunni. Í ljós kom að útfellingar höfðu myndast í holunni en einungis var hægt að mæla niður að 567 m. Útfellingu var að finna í holutoppi en útfellingin varð þykkari eftir því sem neðar dró og mun hafa minnkað þverskurðarflatarmál leiðarans um 50% (Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson 1993).

Í nóvember sama ár var ákveðið að hreinsa holuna af útfellingunum Ekki tókst að hreinsa dýpra en í 552 m, því að leiðarinn var slitinn í sundur og hafði fallið niður. Mælingar sýndu að útfellingarnar náðu upp í vinnslufóðringuna og allt að holutoppi. Þykkt útfellinganna fór upp í nokkra tugi millimetra þar sem hún var þykkust. Víddarmæling sýndi einnig að vinnslufóðringin var (eftir hreinsun) hrein af útfellingum ef frá eru taldir um 5 m langir kaflar á um 385–395 m dýpi og ofan við topp leiðarans á 503 m dýpi. Á þessum köflum eru útfellingarnar um 20–30 mm þykkar (Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson, 1994).

Í lok apríl 1994 var rekstri saltverksmiðjunnar Reykjanesi hætt en holan var látin blása áfram (Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson 1994; Verkfræðistofan Vatnaskil hf. 2000). Í júlí 2000 var ákveðið að hreinsa leiðslur á yfirborði þar sem taka átti

saltverksmiðjuna í notkun að nýju. Verkið reyndist öllu viðameira en búist hafði verið við og tók um 4 vikur að hreinsa. Tekin voru um 30 sýni af útfellingum bæði fyrir og eftir blendu og rannsökuð með tiltækum aðferðum. Niðurstöðum þeirra rannsókna er lýst hér á eftir.

Tafla 3. Helstu breytingar sem orðið hafa á vinnslu holu 9 Reykjanesi á tímabilinu 1983–1998, svo og skráðar aðgerðir og viðgerðir. Tekið saman úr gögnum frá Verkfræðistofunni Vatmaskilum sf. (1993a, b, 1994, 1995, 1996, 1997, 1998a, b og 2000).

Dags.	meðalpr. bar	blenda mm	streymi kg/s	vinnsla milj. tonn	athugasemdir
11-júl-84	44,0	em*	30	0,78	Hola hreinsuð
9-jan-85	47,5	em	30	1,22	Blenda hreinsuð
26-jún-85	41,0	em	30	1,64	Hreinsun útfelling, töflur 8, 9
6-jan-86	44,0	em	30	2,14	Holan hreinsuð
5-maí-86	44,5	em	30	2,44	Hreinsun útfelling, tafla 7
18-maí-87	46,2	85,0	77,4	3,40	
13-apr-91	37,0	91,1	68,1	11,64	Skipt um sprengidisk
20-apr-91	37,0	91,1	70,1	11,68	Skipt um disk
26-júl-91	37,0	91,1	69,8	12,27	Skipt um loka engin útfelling í holutoppi
28-sep-91	37,0	40,0	13,5	12,65	Skipt um blendu
8-nóv-91	39,0	52,0	24,0	12,70	Skipt um blendu
20-nóv-91	39,0	52,0	20,2	12,72	Nýr diskahaldari
21-nóv-91	39,0	52,0	22,9	12,73	Skipt um disk
23-nóv-91	39,0	52,0	23,9	12,73	skipt um disk
18-des-91	39,0	52,0	24,2	12,78	Skipt um disk
6-mar-92	42,0	52,0	24,9	12,95	Mæling útfelling í holutoppi
14-apr-92	35,5	98,0	57,1	13,03	Skipt um blendu
29-apr-92	34,0	98,0	71,5	13,11	Mæling
23-sep-92	33,4	109,0	87,4	13,96	Skipt um blendu útfelling í skilju, tafla 9
9-jan-93	29,5	109,0	77,0	14,72	Viðgerð á búnaði
31-jan-93	29,5	109,0	73,0	14,86	sk.um spr.disk
5-apr-93	28,0	109,0	49,1	15,30	Blendan skoðuð
29-apr-93	27,5	109,0	67,9	15,44	sk. um spr.disk
1-jún-93	27,5	109,0	73,5	15,65	Viðgerð
11-jún-93	27,5	115,1	78,6	15,72	Skipt um blendu
6-júl-93	19,8	150,0	87,2	15,91	
3-ágú-93	19,5	150,0	38,9	16,12	Lagfæringar.
24-sep-93	18,8	150,0	43,4	16,50	hola lokuð útfelling, niður í 567m
25-sep-93	29,0	150,0	0,0	16,50	Lokuð. töflur 8, 9
1-okt-93	27,5	100,0	76,5	16,50	Ný blenda.
8-okt-93	27,8	109,0	85,0	16,55	Skipt um blendu.
12-okt-93	22,5	120,0	80,1	16,58	Skipt um blendu.
28-nóv-93	21,0	120,0	2,9	16,89	Uppborun. tafla 9
9-des-93	25,0	120,0	25,6	16,89	Hleypt upp.
10-des-93	25,0	120,0	92,3	16,90	Sama blenda.
20-des-93	28,0	120,0	105,3	16,98	Nýr mælir
18-mar-94	25,0	125,0	98,8	17,72	Blenduskipti.
3-maí-94	37,2	53,5	27,9	18,10	Blenduskipti.
24-ágú-94	39,5	53,5	2,6	18,40	Viðgerðir.
26-sep-94	16,0	53,5	0,0	18,40	Opnað á blendu.
3-okt-94	41,0	53,5	23,1	18,40	Viðgerðir.
4-okt-94	41,0	53,5	32,8	18,41	Viðgerðir.
21-feb-95	42,0	53,5	32,2	18,80	Blenda skoðuð.
24-feb-95	42,0	53,5	32,2	18,81	Viðgerðir.
14-mar-95	42,5	53,5	32,9	18,86	Viðgerðir.
3-maí-95	42,0	53,5	9,8	19,01	Viðgerðir.
5-maí-95	42,0	53,5	27,1	19,01	Viðgerð lokið.
18-júl-95	18,0	53,5	0,7	19,23	Viðg. á holutopp.
25-júl-95	18,0	53,5	0,0	19,23	Lokuð.
1-ágú-95	18,0	53,5	0,0	19,23	Lokuð.
8-ágú-95	18,0	53,5	0,0	19,23	Lokuð
9-ágú-95	37,5	53,5	26,5	19,23	Opnað á blendu.
2-okt-95	18,0	53,5	5,8	19,36	Lokað á blendu.
3-okt-95	18,0	53,5	0,0	19,37	lokuð.
9-okt-95	18,0	53,5	0,0	19,37	lokuð
12-okt-95	40,5	53,5	26,2	19,37	Opnað á blendu.
30-nóv-95	40,0	53,5	30,1	19,50	Viðgerð.
9-des-95	40,0	53,5	30,4	19,52	Viðgerð.
2-feb-96	41,9	53,5	32,1	19,68	Diskur fór.
11-mar-96	37,9	53,5	29,7	19,79	Nýr digit.mælir.
22-apr-96	37,2	53,5	29,1	19,90	gaml.mælir kvarð
27-maí-96	43,5	53,5	35,0	19,99	Nýr 2" mælir.
til 21 okt 96	44,0	53,5	34,5	20,40	
frá 25 nóv 96	39,5	53,5	31,26	20,50	engar
til 30 jún 98	39,5	53,5	31,26	22,07	mælingar tafla 10
3 feb 99	38,5		26,55	22,66	Blenda hreinsuð
25 ágú 99	34,5	70			
til 30 jún 00	37,5	70		24,29	

*em = ekki mælt

3.2. Útfellingar úr holu 8

Árið 1977 varð fyrst vart við fyrirstöðu í holu 8 og var talið að hún stafaði af kalkútfellingum vegna suðu vatnsins, svipað og í borholum í Svartsengi. Talið var að suða hæfist á 700–800 m dýpi í holunni og vegna þrýstilækkunar á svæðinu við vinnslu hefði suðuborðið færst neðar (Sverrir Þórhallsson 1977). Útfellingarnar reyndust ekki vera kalk heldur silíkatmassi að mestu úr kísli, járni og magnesíum.

Hrefna Kristmannsdóttir (1979, 1981) gerði allitarlega grein fyrir þessum útfellingum sem náðust úr fódurröri þegar gufuborinn hreinsaði holu 8 í nóvember 1978. Sýnin voru skoðuð í smásjá, einstök korn greind í örgreini (töflur 4 og 5), sýni keyrð í XRD tæki og heildarkísill greindur í nokkrum sýnum. Helstu niðurstöður þessara greiningar eru; eitt sýnanna var bergbrot (tekið úr hristisigti nr. 3) en hin fjögur eru hálfkristallaður silíkatmassi og ógegnsætt efni, sem er líklega mest járn-súlfíð og leir af smektítgerð. Silíkatmassinn er 60–80% af sýnunum. Hann er að mestu úr kísli, járni og magnesíum (tafla 5) og virðist vera úr illa kristölluðu smektíti eða óskilgreindu kísilríku járnmagnesíumgeli (Hrefna Kristmannsdóttir 1984).

Tafla 4. Hóla 8, Reykjanesi. Útfellingar og kísilmagn (Hrefna Kristmannsdóttir 1979).

Sýni nr.	Dýpi m	SiO ₂ % (þunga)*	XRD greining júlí 1999 Sjá nánar nöfn steinda og efnafræðiformúlur þeirra í töflu 14
Rey 1	ofan 440	41,0	Sinkblendi, eirkís
Rey 2	ofan 550		Sinkblendi, eirkís, blýglans
Rey 3	ofan 550		Kalsít og vottur af leir sennilega járn smektít
Rey 4	ofan 730	29,6	Sinkblendi, eirkís, blýglans og sennilega vottur af anhydriti og leir
Rey 5	ofan 730	33,4	Anhydrit, sinkblendi, vottur af kalsíti og leir

* sýni voru brædd í ofni með natríum-hýdroxyði og bræðslutaflan leyst upp í saltsýru og kísillinn mældur í lausn með litrófsljósmæli.

Tafla 5. Örgreiningar af ljósa massanum í útfellingum úr holu 8, Reykjanesi (Hrefna Kristmannsdóttir, 1979).

Sýni %	Rey-1 ¹				Rey-4 ²	Rey-5 ²		
SiO ₂	57,02	55,50	66,60	59,45	50,57	54,30	41,12	54,70
TiO ₂	0	0	0	0	0	0,02	0,05	0,05
Al ₂ O ₃	0,67	1,12	0,71	1,08	3,96	4,07	3,12	3,98
FeO	9,71	11,57	8,95	10,92	17,29	18,33	15,97	17,66
MnO	1,61	1,41	2,03	1,25	0,40	0,38	0,57	0,30
MgO	15,96	18,35	19,65	17,91	12,58	12,30	8,88	13,57
CaO	0,20	0,25	0,33	0,31	1,30	0,54	0,75	0,69
Na ₂ O	0,20	0,27	0,14	0,13	0,07	0,47	0,34	0,45
K ₂ O	0,20	0,18	0,25	0,23	0,32	0,91	0,66	0,92
Summa	85,57	88,65	98,66	91,28	86,49	91,32	71,46	92,34

1) sýni ofan 440 m dýpis. 2) sýni tekið á 730 m dýpi.

Þessi 5 sýni voru svo rannsökuð að nýju 1999. Voru þau keyrð m.a. á ný í XRD tæki, sem nú var komið með tölvuvætt leitarforrit, sem gerir ákvörðun steinda auðveldari. Sýnin, að undanskildu sýni nr. 3, eru öll svört til hálfmött, í flögum með ryði á annarri hliðinni (nr.1), eða eins og grófmulinn sandur, og í sýnum nr. 4 og 5 glyttir á korn sem gætu verið pýrít. Niðurstöður XRD keyrslu leiddi í ljós að sinkblendi eða (sinksúlfíð,

ZnS) greinist í sýnum nr. 1, 2, 4 og 5. Kalkópyrít (eirkís/koparkís, koparjárn-súlfíð CuFeS) og blýglans (blýsúlfíð, PbS) greinast í sýnum 1, 2 og 4 og anhýdrít (kalsíum-súlfat, CaSO₄) er vel greinanlegt í sýni 5 og sennilega í sýni 4. Eftir því sem neðar dregur í holunni eru endurvarpstoppur hærrí, og ber það vott um meiri kristöllum. Sýni 3 glataðist að mestu, en ljósi hlutinn sem eftir var, reyndist vera kalsít. Ekki greindist kísilbunga í neinum sýnunum (þ.e. enginn myndlaus kísill).

Útfellingaskánir, m.a. úr hljóðdeyfi úr holu 8, voru greindar á vegum gulleitarhóps Orkustofnunar, sem vann á vegum Málmís árið 1990. Nær einungis verðmætir, mjúkir (zink, Zn og blý, Pb) og þjálir málmur (kóbalt, Co; kopar, Cu; gull, Au; og silfur, Ag) voru greindir. Niðurstöðurnar er að finna í töflu 6 en þar kemur fram að nokkuð er um kopar, blý, sink og mangan, og talsvert er af gulli og silfri í sýnunum (Hjalti Franzson 1990).

Tafla 6. Efnagreining á útfellingum úr holum 8 og 9, Reykjanesi. Mælieiningar í ppm (Hjalti Franzson 1990).

Sýni	Au	Ag	Cu	Pb	Cd	Bi	Co	Mn	Mo	Ni	Zn
H8-1	0,48	2	42	30	2	<5	<5	78	<5	<5	367
H8-2	0,62	12	122	152	<1	<5	30	1084	<5	9	342
H8-3	4,30	71	779	508	<1	<5	<5	43	<5	<5	203
H9-4a	2,56	11	221	178	<1	<5	<5	19	<5	<5	197
H9-4	2,06	19	330	259	<1	<5	<5	23	<5	<5	242
H9-5a	93,4	>400	32000	14000	58	<5	8	3628	<5	<5	76000
H9-5b	81,0	>400	34000	16000	64	<5	5	3496	<5	<5	82000

H8-1: Útfellingaskán uppi á gamla ryðgaða hljóðdeyfinum við holu 8. H8-2: Útfellingaskán úr seytli sem kemur úr holu 8. H8-3: Útfellingasýni innan úr hljóðdeyfinum úr holu 8. H9-4 og 4a: Úr hljóðdeyfi í holu 9. H9-5a og 5b: Innan úr röri rétt við lokann á holu 9 sem rífið var niður og geymt við pönnuhúsið. a) Við lokann. b) Næsta rör við.

3.3. Útfellingar úr holu 9

Eitt af því sem hefur verið gert í þessu verkefni er að skoða öll XRD og XRF útfellinga-gögn frá Orkustofnun, frá því að holur 8 og 9 voru boraðar. Til eru greiningar frá árunum 1985, 1992 og 1993 eins og sjá má í töflum 8 og 9. Engar lýsingar fylgdu þessum útfellingum að öðru leyti en að þær væru svartar til dökkgráar. Að auki er til ein greining í viðbót úr holu 9 þar sem segir að svo virðist sem útfellingin sé að meginhluta járn-súlfíð með Zn og Cu í. Si og Mg eru ekki í neinu magni (óbirtar upplýsingar frá Hrefnu Kristmannsdóttur 19/8 1985).

Árið 1986 var Dr. Agnes Reyes frá Filipseyjum stödd hér á landi og tók sýni af útfellingu við holu 9, úr röri eftir blöndu þar sem þrýstingur hafði fallið úr 43 í 18 bör-a. Sýnið var greint á Nýja Sjálandi (af Dr. A.R. Gainsford við The Geothermal Research Centre, Wairakei) og eru niðurstöður greininganna sýndar í töflu 7b, en þær hafa áður verið birtar af Baldri Línal (1989). Tafla 7b sýnir að mest er af sinki (27–34%) í útfellingunni, þá kopar (11–14%), því næst járnei (7–8,5%) og blýi (3–4%). Samanlagt eru málmanir um 48–60% af útfellingunni. Tafla 7a sýnir aðra greiningu af sömu útfellingu (Línal 1989). Þar kemur fram að um 80% útfellingarinnar eru blanda af sink-súlfíði, sinkoxíði, koparsúlfíði og járn-súlfíði. Að auki mælast um 5% kísill.

Niðurstöður efnagreininganna frá Nýja Sjálandi þóttu það áhugaverðar að í gulleitar-rannsóknunum 1990 voru greind nokkur sýni úr holum 8 og 9 með tilliti til málmleitar

og er þær niðurstöður að finna í töflu 6 (Hjalte Franzson 1990). Þar kemur fram að verulegt magn er af málum eins og kopar (>3000 ppm), blý (>14000 ppm), sinki (>76000 ppm) og mangani (>3400 ppm) í þeim. Gull mældist um 80–90 ppm og silfur meira en 400 ppm.

Tafla 7. *Hola 9, Reykjanesi, niðurstöður efnagreininga á svartri útfellingu, sem myndaðist við þrýsting hærri en 10 bör (Lindal 1989).*

a) Hefðbundnar greiningaraðferðir.	%
Kísill (SiO ₂)	5.5
Járn sem járnsúlfið (FeS)	11.6
Kalsíum sem kalsíumsúlfið (CaSO ₄)	0.8
Magnesium sem magnesíumoxíð (MgO)	0.1
Ál sem áloxíð (Al ₂ O ₃)	0.3
Kopar sem koparsúlfið (CuS)	31.5
Mangan sem mangantvíoxíð (MnO ₂)	0.2
Sink sem sinkoxíð (ZnO)	36.7
Sink sem sinksúlfið (ZnS)	2.1
Ofgnótt súlfats sem (SO ₃)	2.8
Glæðitap við 800°C	2.7
b) hálfmagnbundin efnagreining gerð með litrófsgreiningum	%
Kísill	1.5–2
Sink	27–34
Blý	3–4
Silfur	0.3–0.5
Arsenik	0.04–0.06
Kopar	11–14
Járn	7–8.5
Ál	0.15–0.2
Magnesium	0.1–0.15
Kalsíum	0.6–0.8
Baríum	0.001–0.0015
Strontíum	0.005–0.007
Bór	0.006–0.009
Kadmíum	0.05–0.07
Gull	0.005–0.015
Mangan	0.2–0.3
Króm	0.001–0.003
Gallíum	0.0004–0.0006
Vanadíum	0.0003–0.0005
Títan	0.005–0.007
Nikkel	<0.0005
Tin	<0.0001
Mólybden	0.0004–0.0006
Kóbalt	<0.001
Yttríum	0.0001–0.0002
Indíum	<0.0001
Antímon	0.0035–0.0045

Tafla 8. Hola 9, Reykjanesi, útfellingar. Hálf magnbundnar greiningar (gerðar í XRF-tæki).

	Ú-RN		ÚRNES	
	8504 ¹	8505 ²	9319 ³	9320 ⁴
Fe	mikið	mikið	talsvert	talsvert
Zn	mikið	mikið	talsvert	
Cu	mikið	mikið	lítið	lítið
S	mikið	mikið	talsvert	
Si	vottur	vottur	talsvert	
Ca	vottur	vottur		
K	vottur	vottur		
Cl	vottur	vottur		
Mn			vottur	vottur
Pb				vottur

- 1) Frá ágúst 1985; höggvið úr leiðslu. Mg sást ekki við mestu mögnun. 2) Frá ágúst 1985; úr hrúgu við holutopp. Mg sást ekki við mestu mögnun. 3) 1/12 1993; sýnið er úr lóði af 466 m dýpi. XRD greining einnig gerð. 4) 3/12 1993. XRD greining einnig gerð.

Eins og fram hefur komið og sýnt er í töflu 3 voru leiðslur á yfirborði rétt við holu 9 hreinsaðar nokkuð ört fyrstu árin. Í september 1993 var ljóst að verulegar útfellingar höfðu myndast í holu 9, eftir að hún hafði verið rekin við lægri toppþrýsting en fyrr. Einungis var hægt að körfumæla niður í 567 m dýpi. Útfellingu var að finna í holutoppi og varð hún þykkari eftir því er neðar dró þannig að þverskurðarflatarmál leiðarans minnkaði um 50% (Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson 1993). Sýni sem náðust upp af um 466 m dýpi reyndust innihalda talsvert af járn, sinki, brennisteini og kísli, lítið af kopar og vott af mangani. XRD-greining sýndi aðallega sinkblendi (tafla 9). Sýnataka, varsla og skráning frá þessari hreinsun var fremur ófullkomin og lítið er nú til af sýnum.

Árið 1999 var gerð tilraun til að fá sýni frá hreinsuninni. Tekin voru til rannsóknar sýni við eftirtalda staði; 10 m frá holutoppi (nr. 5, sjá töflu 10) meðfram leiðslunni (nr. 6), á planinu við borholuna (nr. 4, sennilega eftir blendu) og úr gámum við skiljustöð (nr. 7, 8). Að auki voru sýni tekin við holutopp, þ.e. við vatnssýnatökustað. Niðurstöður XRD-greininga er að finna í töflu 10.

Tafla 9. Hola 9, Reykjanesi, útfellingar, niðurstöður XRD greininga frá 1985, 1992 og 1993.

Sýni	Sjá nánar nöfn steinda og efnafræðiformúlur þeirra í töflu 14.
Rnú 4 ¹	Aðallega sinkblendi og vottur af e-u Fe-oxíði.
Rnú 5 ¹	Aðallega sinkblendi og vottur af e-u Fe-oxíði.
9204 ²	Sinkblendi, myndlaus kísill, ferrokesterít ($Cu_4FeZnSn_2S_8$) eða nantokít (CuCl) og salt (NaCl)
9205 ³	
9319 ⁴	Sinkblendi og Mg-silikat, sennilega talk.
9320 ⁵	Sinkblendi og Mg-silikat, sennilega talk.

- 1) Sýnin eru trúlega þau sömu og 8504, 8505 (tafla 8) frá ágúst 1985.
 2) 11/8 1992, í skilju við holu 9 (P=9 bar).
 3) 11/8 1992, þessi útfelling situr ekki á veggjum en skolast til og safnast í botn og skot.
 4) 1/12 1993. Sýnið er úr lóði af 466 m dýpi.
 5) 3/12 1993. Sýni 9204 og 9205 keyrt og greint júlí 1999.

Tafla 10. Hóla 9, Reykjanesi, útfellingar, niðurstöður úr XRD keyrslu. Safnað í nóvember 1998 og í maí 1999.

Sýni nr.	Sjá nánar nöfn steinda og efnafræðiformúlur þeirra í töflu 14.
4*	Sinkblendi, blýglans, eirkís, anglesít, ± myndlaus kísill
5*	Sinkblendi, sennilega eirkís, anglesít, ± kesterít-stannít ($\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ - $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$) og myndlaus kísill og vottur af leir
6*	Sinkblendi, blýglans, anglesít, kesterít/stannií og vottur af leir
7	Aðallega sinkblendi og leir (sterkur toppur í $d=13.33$ Å) og gæti innihaldið Mg-silikat
8	myndlaus kísill + vottur af sinkblendi

*ath greiningar á þessum sýnum eru mjög erfiðar þar sem toppar eru mjög lágir og margir.

Eins og í fyrri sýnum eru það súlfíð sem eru helstu kristölluðu útfellingarnar, ýmist með sinki, blýi, kopar eða öðrum málmmum. Einnig greinist ókristallaður kísill í sýnum 4 og 5. Þegar lítið er á hálfmagnbundnu greiningarnar (tafla 8) sést einnig að nokkuð hefur fallið út af kísli og járn, sem ekki eru á kristölluðu formi. Ekki virðist vera neinn munur á þeim sýnum sem safnað var nú og þeim sem áður voru greind. Fjölbreytnin virðist vera meiri í sýnum greindum 1999. Hugsanlegar skýringar á fleiri steindum eru meiri ummyndun steindanna og það að tækni í greiningu sýna með leitarforritum er nú til staðar en áður var allt var unnið handvirkt.

Vorið 1999 safnaðist fyrir í síupappir útfelling við töku vatnssýnis úr hól 9 og var hún athuguð í kjölfarið. Þetta voru örþunnar flögur, svartar og ryðbrúnar og ekki reyndist vera nægilegt magn af þessu ryðbrúna til að greina það eitt og sér. Svarta efnið virtist vera meira kristallað og flögurnar reyndust vera sinkblendi og magnetít. Einnig greindist halít (salt). Er síupappírinn var látinn þorna hafa saltkristallar myndast úr vökvanum, sem komu svo með þegar flögurnar voru skafnar af pappírnum.

Í júlí 2000 fór fram allmikil hreinsun á leiðslum frá hól 9 að skiljustöð og þaðan að hljóðdeyfihúsi. Tekin voru um 30 sýni og er nánari staðsetningar sýndar á mynd 10. Sýnin voru fyrst og fremst rannsökuð með tilliti til steindasamsetningar í handsýni, á XRD-tæki (á Orkustofnun), í smásjá og málmsmásjá (Jarðfræðahúsi Háskóla Íslands), þá voru nokkur sýni keyrð í XRF-tæki (á Orkustofnun) til athugunar á efnasamsetningu þeirra svo og rafeindasmásjá (SEM á Iðntæknistofnun) og örgreini (EPM á Norrænu Eldfjallastöðinni) og að lokum voru 12 sýni send til Kanada í heildar- og snefilefna-greiningu.

Útfellingunum má skipta í flokka eftir því hvar þær eru teknar: 1) fyrir blendu, 2) eftir blendu og næstu 150 m þaðan í frá, (sjá mynd 10), 3) sýni tekin við skiljustöð og 4) sýni tekin við holutopp, en þau náðust er gerð var körfumæling í apríl 2001.

Magn útfellinganna var verulega meira heldur en búist var við og tók hreinsunin yfir 4 vikur. Lítið sem ekkert var af útfellingum frá holutoppi að blendu. Þar voru útfellingar, nokkrir mm að þykkt og er útfellingin svört neðst eða næst röri en þar ofan á hlaðast lög af súlfíðum og efst er litur þeirra gjarnan kopargrænn (mynd 11). Tekin voru þó nokkur sýni og hluti þeirra keyrður í XRD-tæki og er niðurstöðurnar að finna í töflu 11. Sinkblendi, koparkís og leir (klínókrýsótíl og saponít) eru í mestu magni en einnig vottar fyrir pyrrhotíti og blýglans (tafla 14).

Frá blendu og næstu 150 m voru tekin yfir 20 sýni, allt frá nokkrum grömmum upp í 10 kg. Strax eftir blendu var a.m.k. 5 m kafli af 400 mm víðu rörinu nær stíflaður af útfellingum, þannig að aðeins var um 8–10 sm rennslisop. Líklegt er að allt að næstu 10 m

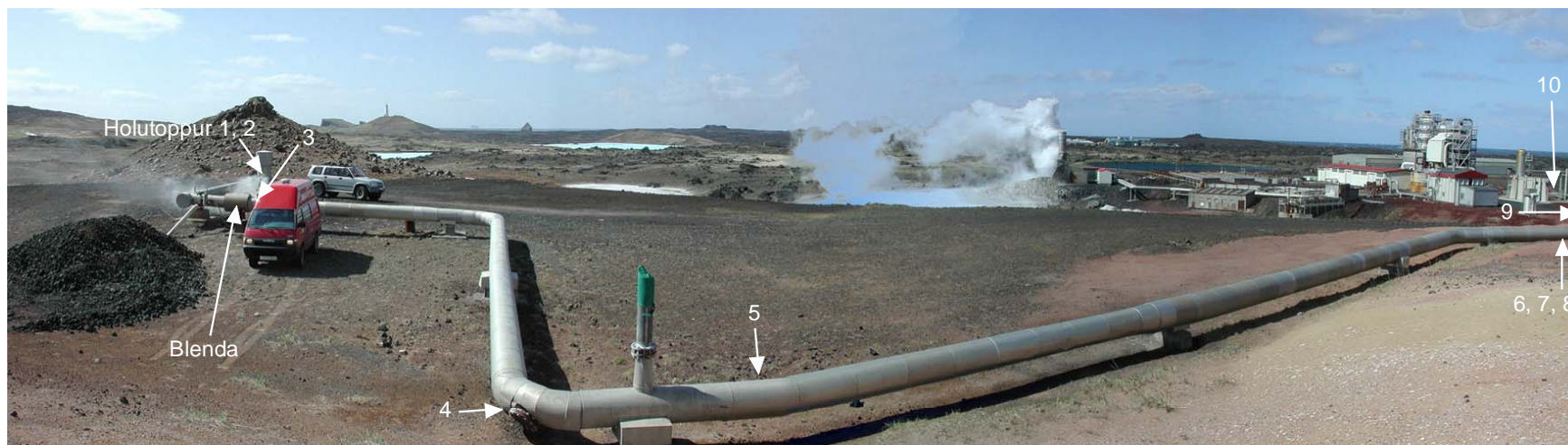
frá blendu hafi verið þannig hlaðnir af útfellingum eins og sjá má á myndum 12 og 13. Næst rörinu mynda þær þunna harða svarta húð eins og svart matt gler og þar má sjá tæringu á rörinu. Þá eru mishörð svört og gráleit lagskipt útfellingar. Þar sem útfellingarnar eru mjög þykkar þ.e. strax eftir blendu er miðja útfellingarinnar oft laus í sér, ólagskipt og illa eða ekki kristölluð. Er fjær dregur kemur lagskiptingin aftur. Þykkt útfellinganna fer minnkandi er fjær dregur blendu og þar sem síðustu sýnin voru tekin um 150 m frá blendu eru útfellingarnar aðeins örfáir sm að þykkt (mynd 15).

Niðurstöður XRD-greininga er að finna í töflu 11. Blýglans og eirkís halda áfram að falla út ásamt því að kísill í ókristölluðu formi byrjar að falla út, svo og blýsambönd ýmist sem súlfíð (PbS) eða sem súlföt (PbSO₄). Jafnframt eykst fjölbreytni kristöllumar með einhvers konar klóríðkristöllum, kótunnít (PbCl₂) og halít (NaCl) koma fram. Pyrrhótít fannst ekki.

Frá blendu er 400 mm aðfærsluæðin um 30 m löng en þá er skipt yfir í 500 mm vítt rör en við það lækkar þrýstingurinn og trúlega hafa útfellingarnar aukist við það. Í þessu 500 mm víða röri var útfelling (nr. 40 á mynd 14) um 12–15 sm að þykkt og 50 cm að lengd. XRD greining (tafla 11) sýnir að mestu ókristallað efni en neðst er að finna ópal (ókristallaðan kísil) og vott af sinkblendri, eirkís/koparkís og blýglans. Halít og/eða hugsanlega klórargýrít (Ag(ClBr)) er vel kristallað (tafla 14).

Nokkur sýni voru frá skiljustöð og eru niðurstöður fyrir þau sýndar í töflu 11 og á myndum 16 og 17. Eins og sjá má á myndunum eru útfellingarnar allverulegar og greinilega má sjá lagskiptingu þar sem skiptast á dökk og ljós lög. Inni á milli þessara laga er stundum örþunn mött svört rönd sem ekki náðist að greina. Útfellingarnar eru mjög frauðkenndar og léttar eins og vikur. Þetta er samkvæmt XRD-greiningu að mestu ókristallað efni, en vottur er af sinkblendri og halíti (salti).

Í apríl 2001 var holan körfumæld og komu þá upp 4 sýni, sem voru keyrð í XRD og eru niðurstöðurnar sýndar í töflu 13. Hér sker sýni 2001–07 sig úr en það er halít, en hin eru súlfíð þar sem sýni 2001–09 er best kristallað.



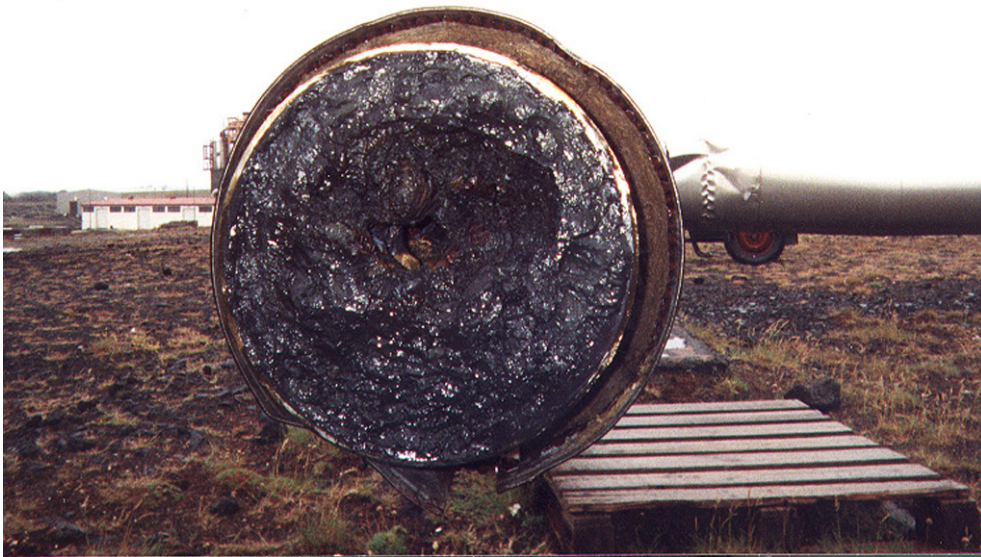
Mynd 10. Horft yfir leiðslur frá holu 9, Reykjanesi. Sýni frá holutoppi 1= no. 2001-06; 2= no. 2001-09 (sjá töflur 17 og 18); sýni eftir blendu 3= no. 29; 4= no. 30; 5= no. 4; 6, 7 og 8 = sama útfellingin og no. 40 á mynd 14; 9= no. 41; 10= sýni frá skiljustöð no.13. Mynd tók Guðmundur Ómar Friðleifsson.



Mynd 11. Mynd tekin fyrir blendu af um 5 mm þykkum útfellingum; aðallega blýglans, eirkís og leir, vottur af pyrrhottí. Sýni 20– 22 í töflu 11.



Mynd 12. Útfellingar í leiðslum frá holu 9 Reykjanesi. Myndin er tekin strax eftir blendu við hreinsun í júlí 2000, rennslisop er um 8 sm. Útfellingar eru aðallega ókristallaður kísill og járnoxíð (allt að 85%). Næst röri er sinksúlfíð, þá koparsúlfíð og blýsúlfíð (allt að 15%). Sýni 16, 17 og 18 í töflu 11.



Mynd 13. Útfellingar í leiðslum frá holu 9 Reykjanesi. Myndin er tekin 4 m frá blendu við hreinsun í júlí 2000. Útfellingar þær sömu og að ofan.



Mynd 14. Útfelling nr. 40 (tafla 11) úr leiðslu frá holu 9 Reykjanesi. Útfellingin er um 15 til 17 sm að þykkt.



Mynd 15. Útfellingar, 3–6 cm þykkar, í leiðslum frá holu 9 Reykjanesi. Myndin er tekin um 150 m frá blendu við hreinsun í júlí 2000.



Mynd 16. Útfellingar við skiljustöð, sjólögn frá jöfnunargeymi. Niðurstöður XRD-greiningar í töflu 11



Mynd 17. Útfelling í sjólögn við tank við skiljustöð, rennslisop 22 sm.

Tafla 11. Niðurstöður XRD greininga frá hreinsun holu 9 Reykjanesi júlí 2000.

	Sýni	ZnS sinkblendí	CuFeS ₂ eirkis	PbS blýglans	PbSO ₄ anglesít	Leir	SiO ₂ kisill	annað	
	Nr.								
Fyrir blendu	21a	++++	+			vottur			
	21b	++	++						
	21c	+	+++						
	22a	+	+			+		vottur af Fe ₇ S ₈	
	22b	+	+	+		+1)		+ Fe ₇ S ₈	
	20	+	++						
Fast við blendu	31a	+	vottur				++		
	31b	+++		+				vottur af Fe ₇ S ₈	
	31c	+++				+		vottur af Cu ₅ FeS ₄	
Eftir blendu	19	+++	+		+				
	18	++++			+				
	17	++	+		+	+			
	16	+++	vottur		+				
	33	+++			vottur				
	32a	vottur							
	32b	vottur					+		
	29-1	++	+	vottur			+		
	29-2	++	+		+		+		
	29-4	++	++		+		+		
	29-3	++	+		+		+		
	29-5	++	vottur		+		+		
	1a	+++		++				+ PbCl ₂	
	1b	++		+					
	1c	+							
	2a	++	vottur			vottur		+	
	2b	++	vottur			vottur			
	2c	++	vottur			vottur			
	26	++	vottur	+				+	
	5	++	vottur?	vottur?				+	
	4	+	vottur?	vottur?				++	
	6a	++	++	++					vottur af Cu ₅ FeS ₄ ?
	6b	vottur						+	
	6c	vottur						+	
	7a	+	+	+				+	
	7b	+	vottur	vottur				+	
	40a	vottur						++	vottur af Ag (Cl,Br) / NaCl
	40b	vottur						++	vottur af Ag (Cl,Br) / NaCl
	40c	vottur	vottur	vottur				+	+++ Ag (Cl,Br) / NaCl
	40d	+						+	++ Ag (Cl,Br) / NaCl
	40e	+						+	
	41	+	vottur					++	

Tafla 12. *Hola 9 Reykjanesi, útfellingar við skiljustöð, niðurstöður úr XRD greiningu frá 2002.*

Sýni	NaCl	ZnS	SiO ₂	Annað
14 ljóst	+	+		Líkist Mg-silikati, hár bakgrunnur
14 Dökkur	+	+		Líkist Mg-silikati, hærri
15	+		+	
12	+		+	Óþekkt (d= 2,03 Å)
11 ljós	++	+		hár bakgrunnur
11 svart	+	+	+	hár bakgrunnur

Tafla 13. *Hola 9 Reykjanesi, útfellingar úr holutoppi og af 0 til 530 m dýpi, niðurstöður úr XRD greiningu frá 2001.*

Sýni	ZnS	CuFeS ₂	PbS	leir	NaCl	KCl
2001-06 ¹⁾	+	vottur	vottur	vottur		
2001-07					++	+
2001-08	+	vottur	vottur	vottur		
2001-09 ¹⁾	++	+	vottur	vottur		

¹⁾ Sjá nánar töflu 17. Sýni 06: Utan á 2" röri niður úr holutopp. 07: Kom inn í kórflu milli 0 og 530 m dýpis. 08: Kom í kórflu á milli 0 og 452 m dýpis. 09: Föst útfelling í holutoppi.

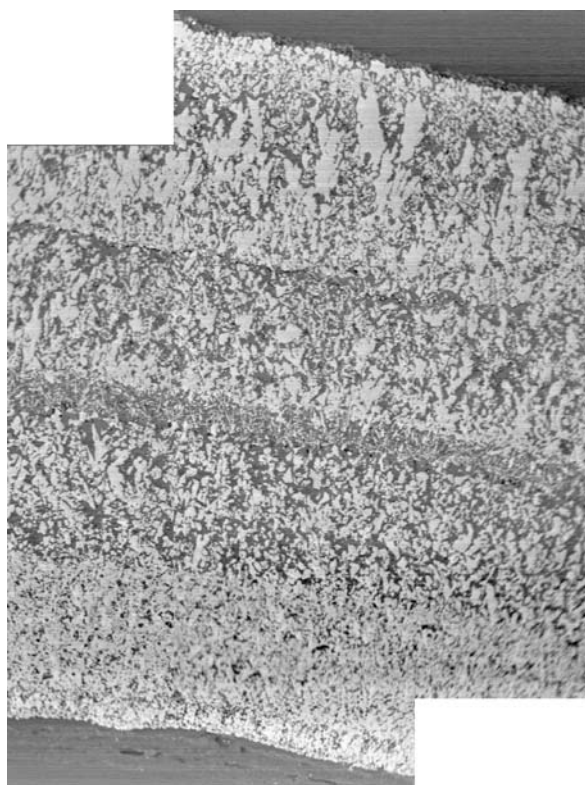
Tafla 14. *Nöfn algengustu steindanna sem nefndar eru í greininni og efnafræðiformúlur þeirra.*

Ísl. steindanafn	Enskt steindanafn	Efnasamsetning	Formúla
Anglesít	Anglesite	blýsúlfat	PbSO ₄
Anhydrit	Anhydrite	kalsíumsúlfat	CaSO ₄
Blyglans	Galena	blýsúlfíð	PbS
Eirglans	Chalcocite	koparðísúlfíð	Cu ₂ S
Eirkís/ Koparkís	Chalcopyrite	koparjárnðísúlfíð	CuFeS ₂
Kalsít/kalk	Calcite	kalsíumkarbónat	CaCO ₃
Kesterít-stannít	Kesterite-stannite	koparsinktin/koparjárnþinsúlfíð	Cu ₂ ZnSnS ₄ -Cu ₂ FeSnS ₄
Kvars	Quartz	kísildíoxíð	SiO ₂
Magnetít	Magnetite	járnnoxíð	FeFe ₂ O ₄
Markasít	Marcasite	járnúlfíð	FeS ₂
Minnesótít	Minnesotite	járn magnesíumlagsilikat	(Fe,Mg) ₆ Si ₈ O ₂₀ (OH) ₄
Nantókít	Nantokite	koparklóríð	CuCl
Opall/myndlaus kísill	Opal/amorph silica	vatnaður kísill	SiO ₂ nH ₂ O
Pyrrhótít	Pyrrhotite	járnúlfíð	Fe ₇ S ₈
Pýrit/glópagull	Pyrite	járnðísúlfíð	FeS ₂
Salt	Halite	natríumklóríð	NaCl
Salt	Sylvite	kalíumklóríð	KCl
Sinkblendí	Sphalerite	sinksúlfíð	ZnS
Talk	Talc	magnesíumsilikat	Mg ₆ (Si ₈ O ₂₀)(OH) ₄
Tin-pýrit	Ferrokesterite	koparjárnþinsúlfíð	Cu ₄ FeZnSn ₂ S ₈

3.3.1. Rafeindasmásjá og örgreining

Ætlunin var að greina í rafeindasmásjá (Scanning Electron Microscope; SEM á Iðntæknistofnun) a.m.k. tvö sýni tekin fyrir blendu (nr. 23 og 22, sjá mynd 11) og önnur tvö eftir blendu (nr. 29, sjá mynd 13 og nr. 6). Í rafeindasmásjá má greina magnbundið efnasamsetningu þeirra efna sem mikið er af og jafnframt mæla mismunandi hluta sýnisins. Því miður gekk ekki að greina sýnin eftir blendu magnbundið þar sem þau reyndust ekki nægjanlega þétt, voru groppótt og þornuðu og slípuðust því mjög illa.

Sýnin fyrir blendu reyndust ögn skárr, en þau eru að mestu af kristölluðum súlfíðum, sem mynda örþunn lög eins og mynd 18 sýnir. Niðurstöður punktmælinga úr rafeindasmásjóni voru aðeins hálfmagnbundnar. Sýni tekið fyrir blendu (nr. 23) gaf þó berlega til kynna að sinkblendid byrjar fyrst að kristallast og þá sennilega í samvexti með eirkís, en inni á milli er sennilega gler með jafn miklu af Si og Fe en sex sinnum minna af Mg og eitthvað minna af Al og Ca. Cu og Zn koma líka fyrir í einhverju magni. Sýni tekið á sama stað (nr. 22) var svo keyrt í örgreini (EPM, Electron Probe Microanalysis á Norrænu Eldjallastöðinni), sem greinir magnbundið í sýninu nokkur mikron að þvermáli. Einnig er unnt að skanna magn ákveðinna efna í þversniði. Þær niðurstöður eru í töflum 15 og 16. Þar kemur fram samsetning sinkblendis sem er ekki hreint ZnS heldur er þar lítið magn af járni, og enn minna af kopar og blýi. Í eirkís er einnig að finna örlítið magn af blýi og sinki, fyrir utan koparinn, járnið og brennisteininn. Dökk ásýnd, nær svört, og glerjuð var einnig greind og reyndist hafa tvenns konar samsetningu, sem kemur aðallega fram í mismun á kísilmagni, 46% eða 9%, og í áli, um 5% eða yfir 50%, sjá nánar í töflu 16.



Mynd 18. “Backscatter” mynd tekin í rafeindasmásjá af 5 mm þykkri útfellingu úr holu 9 Reykjanesi.

Tafla 15. Örgreiningar (SEM) sinkblendis og eirkíss úr leiðslu frá holu 9, Reykjanesi.

Efni	Sinkblendi	Eirkís
Cu	0,31–0,45	34,06–33,58
Zn	56,34–55,83	0,27–0,56
Pb	0,16–0,27	0,18–0,32
Fe	2,96–3,38	30,94–31,27
S	33,22–32,82	34,85–34,49
summa	92,99–92,74	100,25–100,22

Tafla 16. Örgreiningar (EPM) af útfellingu nr. 22, fyrir blendu, holu 9 Reykjanesi (sjá mynd 10 um nánari staðsetningu).

	Þunga %	Þunga %
SiO ₂	46,5	9,3
TiO ₂	0	0,07
Al ₂ O ₃	4,6	53,6
FeO	24,7	10,9
MnO	0,6	0,07
MgO	9,2	1,3
CaO	1,6	0,2
Na ₂ O	0,7	0,2
K ₂ O	0,1	0,1
P ₂ O ₅	0,03	0,2
Summa	88,9	75,9

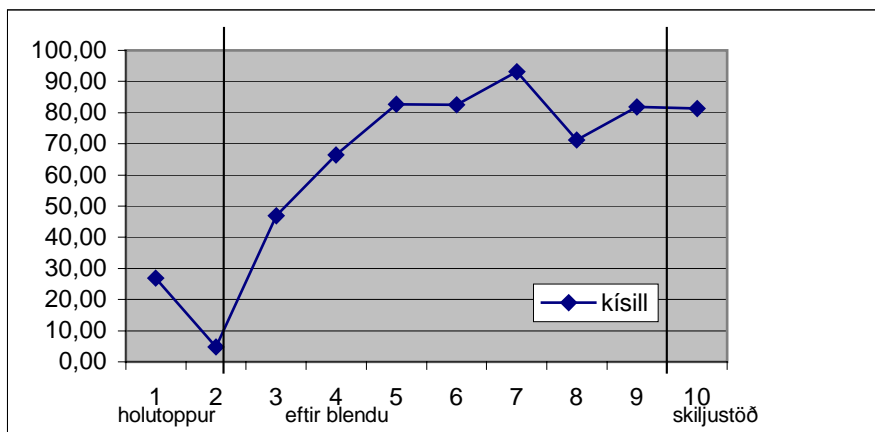
Sýni nr. 29, sem var tekið strax eftir blendu, var punktagreint í rafeindasmásjóni og eru þessar niðurstöðurnar helstar : Næst röri (nokkrir mm) eru súlfíð, örugglega sinkblendi, sennilega eirkís í litlu magni og blýglans rétt sést. Er fjær dregur röri, þ.e. inn að miðju þess og inni á milli súlfíðanna er sennilega ókristallaður massi með margskonar samsetningu. Auk þessa er örþunn rönd af eirkís og þá nær eingöngu ókristallaður massi úr kísil-ál-járn oxíði. Kísillinn gæti verið á bilinu 60 til 66%, álið á milli 1–6% og járníð 2–7% (hálfmagnbundin greining).

3.3.2. Aðal- og snefilefnagreining

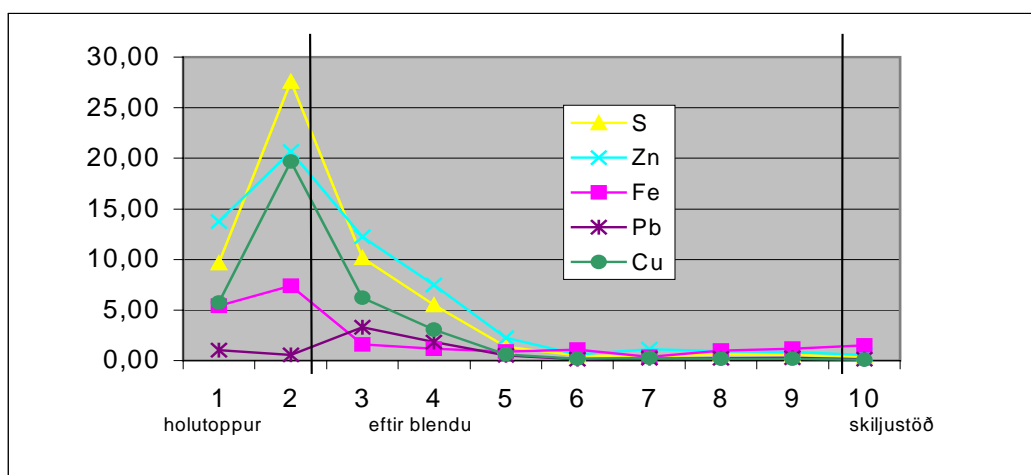
Tólf sýni, tíu frá holu 9 og tvö frá holu 8, voru send til Toronto í Canada til aðal- og snefilefnagreininga og er þær niðurstöður að finna í töflu 17. Tvö fyrstu sýnin merkt 2001-6 og -9 eru holutoppsútfellingar, þær sömu og í töflu 13. Sýnatökustaðir eru sýndir á mynd 10. Sýni 40N, M og E eru ein og sama útfellingin; um 12 sm að þykkt og 50 sm að lengd (mynd 14). 40N er neðst (næst röri), 40M er í miðjunni (mjög laust í sér) og efst er 40E. Sýni 13 er frá skiljustöð.

Aðalefnagreining á 2001-6 og -9 sýnir að fyrri sýnið er tvenns konar, annars vegar kísil-járn- og magnesíumoxíð og hinsvegar sink- og koparsúlfíð. Seinna sýnið inniheldur mun minna af kísli eða um 5%, meira af járn, sinki- og koparsúlfíði.

Styrkur kísils úr leiðslum frá holu 9 eykst verulega, eða frá 47% og upp í rúmlega 80% er fjær dregur blendu (mynd 19). Styrkur annarra efna minnkar samsvarandi því, sink þó mest úr 18% í tæplega 1% (tafla 17, mynd 20). Summa efnispátta úr holutopp (2001-6 og -9) og sýnum 29 og 30 er mjög lág, frá 50 til 86%. Ef styrkur málmanna Zn, Pb og Cu er reiknaður sem súlfíð fer summan í 100–110%. Auðsætt er að sink og kopar teljast til aðalefna í sýnunum í holutoppi og strax eftir blendu, þar sem þunga% þeirra er frá 10 til 30% (Zn) og 4 til 25% (Cu). Greinilegt er að súlfíðin falla út fyrst við holutopp og líklega niðri í holunni þar sem þrýstingurinn er hár (40 bar-a), en kísill á ókristölluðu formi byrjar að falla út eftir blendu við þrýstingsfall.



Mynd 19. Dreifing kísils úr holu 9 Reykjanesi frá holutoppi að skiljustöð. Sjá töflu 17.



Mynd 20. Dreifing nokkurra frumefna úr holu 9 Reykjanesi frá holutoppi að skiljustöð. Sjá töflu 17.

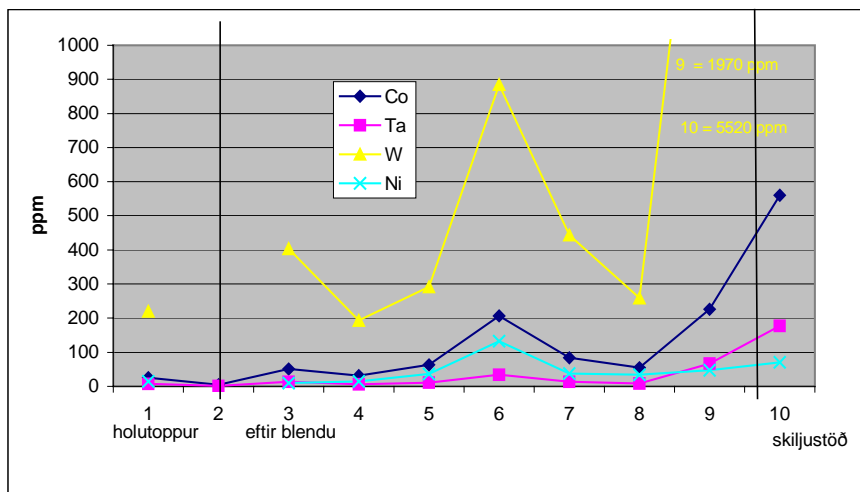
Sýni úr holu 8 eru frá u.þ.b. 530 m dýpi eða þar fyrir ofan (nr. 2, tafla 17) og sýni 5 er frá minna dýpi en 730 m. Heildarsamsetning þessara tveggja sýna er nokkuð frábrugðin samsetningu sýna sem rannsökuð haf verið úr holu 9. Helsti munurinn er styrkur magnesíums sem er 10 til 14% í holu 8, en er mest 6% og yfirleitt minni en 1% í holu 9. Í kafla 3.3. um útfellingarnar í holu 8 var nefnt að eitt sýnið væri sennilega bergbrot. Ekki er ólíklegt að þessi sýni séu menguð af bergi og styður greining á sjaldgæfu jarðmálmum (REE), sem gerð var í Kanada, þá ályktun. Niðurstöðurnar voru á greiningarmörkum í öllum sýnunum nema helst úr sýnunum tveim úr holu 8, en þar voru gildin nær öll lægri en 1,00. Sjaldgæfu jarðmálmarnir eru aðeins í bergi en ekki útfellingum (dreifistuðullinn mjög óhagstæður vatni) og því eðlilegt að draga þá ályktun að sýnin úr holu 8 innhaldi bergbrot.

Breytilegur styrkur snefilefna er í útfellingum (tafla 18). Wolfram (W, mynd 21) er í verulegu magni, allt frá 200 ppm í holu 9 upp í 5500 ppm í sýni frá gufuskilju. Silfur (Ag) kemur næst að magni og er í mestu magni fyrstu metrana eftir blendu eða frá 400 ppm og niður í 47 ppm í skiljustöð. Þá kemur kadmíum (Cd). Talsvert er um gull og

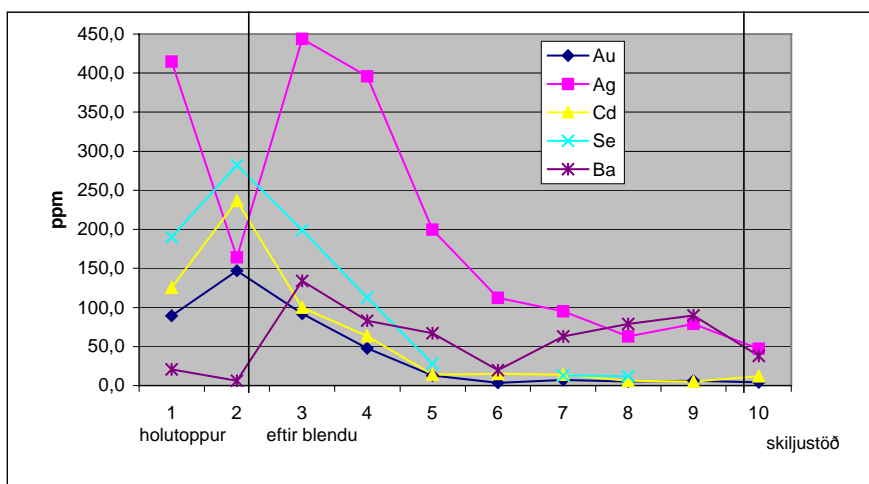
nokkru meira í holunum sjálfum en í leiðslunni frá holu 9 (sjá mynd 22). Efni eins og strontíum (Sr), rúbídíum (Rb) og arseník (As) eru sýnd á mynd 20 en ná ekki 50 ppm í neinni greiningu.

Tafla 17. Niðurstöður greininga á aðalefnum (þunga- %) í útfellingum úr holum 8 og 9, Reykjanesi.

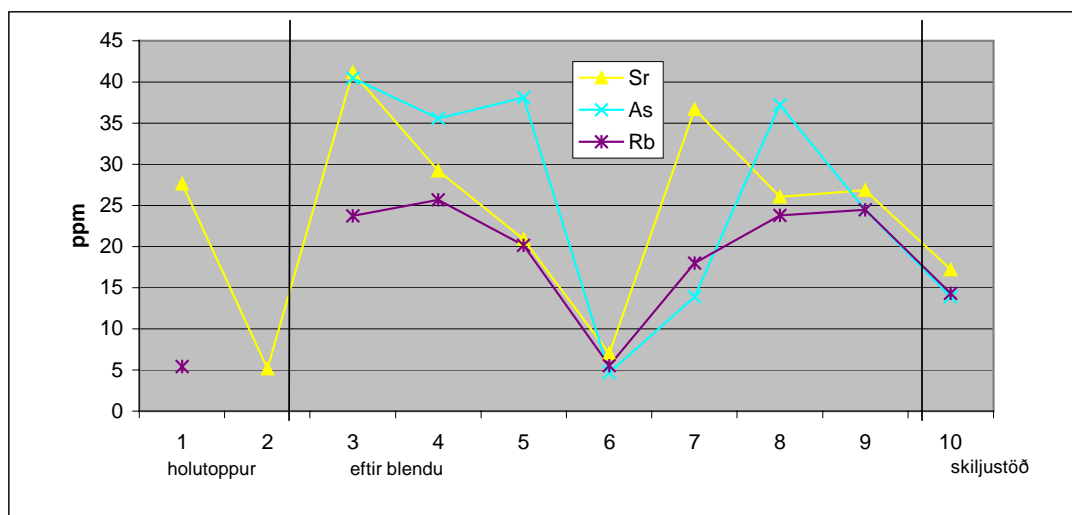
Sýna nr. Nr. á línurítum	Hóla 9										Hóla 8		
	Holutoppur		Eftir blöndu							Skiljustöð		2	5
	2001-6	2001-9	29	30	4	40N	40M	40E	41	13			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
	Sama útfellingin												
SiO ₂	26,91	4,76	47,00	66,51	82,63	93,10	71,17	81,80	82,55	81,35	42	34,43	
Al ₂ O ₃	2,71	0,56	2,86	2,18	1,74	0,54	1,18	2,20	2,33	1,42	1,	3,28	
Fe ₂ O ₃	20,77	28,64	6,32	4,77	3,43	1,47	3,84	4,49	4,40	5,86	14	19,92	
MnO	0,536	0,100	0,660	0,770	0,785	0,091	0,874	1,018	0,990	1,303	1,	0,587	
MgO	6,55	1,12	0,26	0,42	0,28	0,48	0,51	0,38	0,35	0,60	14	9,74	
CaO	0,83	0,14	0,86	0,59	0,46	0,16	1,01	0,59	0,54	0,49	1,	3,19	
Na ₂ O	0,74	0,09	0,82	0,77	0,91	0,34	5,63	0,96	0,81	0,85	0,	0,31	
K ₂ O	0,23	0,04	0,59	0,53	0,47	0,09	0,46	0,54	0,54	0,36	0,	0,10	
TiO ₂	0,013	0,013	0,009	0,010	0,010	0,020	0,016	0,013	0,013	0,020	0,	0,030	
P ₂ O ₅	-	-	-	-	0,01	-	0,01	0,01	0,01	-	0,	-	
Glæðitap	13,73	14,34	14,25	10,04	6,43	3,35	14,15	6,70	6,37	7,30	12	16,10	
Summa	73,02	49,80	73,64	86,59	97,16	99,64	98,85	98,71	98,91	99,57	89	87,70	
ZnS	20,52	30,69	18,27	11,18	3,36	0,91	1,69	1,39	1,26	0,84	5,	9,11	
PbS	1,21	0,66	3,83	2,12	0,502	0,17	0,29	0,26	0,30	0,15	2,	2,04	
CuS	8,67	29,63	9,36	4,61	0,85	0,23	0,39	0,32	0,24	0,18	3,	3,96	
Summa	103,4	110,8	105,1	104,5	101,0						10	102,8	



Mynd 21. Dreifing Co, Ta, W og Ni úr holu 9 Reykjanesi frá holutoppi að skiljustöð. Sjá töflu 18.



Mynd 22. Dreifing Au, Ag, Cd, Se og Ba úr holu 9 Reykjanesi frá holutoppi að skiljustöð. Sjá töflu 18.



Mynd 23. Dreifing Sr, As og Rb úr holu 9 Reykjanesi frá holutoppi að skiljustöð. Sjá töflu 18.

Tafla 18. Niðurstöður snefilefnagreininga á útfellingum úr holu 9 og úr leiðslum þaðan og úr holu 8 Reykjanesi. Allar niðurstöður eru gefnar upp í ppm.

Hola 9 sýni nr.	Nr á línuriti	Au	Co	Se	Ba	Ag	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn	S	W	Ta	Sr	Sn	Sb	As	Rb	Br	Nb	Cs	La	Sc	Zr	V	Ga	
2001-06	1	89,5	26	190	21	415	125	47000	15	8363	137700	99960	220	7,1	28	14			5				0,4	2	14	15	18	
2001-09	2	147,0	5	282	6	164	236	196900		4614	206900	248860		0,8	5	2							0,2	3	8	6	3	
	29	92,1	51	199	134	444	99,6	57830	10	33350	122600	110350	403	13,9	41		9,5	40,5	24	6,1	3	1,0	0,3	0,6	7	7	6	
	30	47,9	32	113	83	396	63,4	28300	15	17610	72411	59010	193	6,6	29	1	7,4	35,6	26	17,1	2	1,1		0,4	5	9	8	
	4	13,1	63	28	67	200	14,2	5672	37	4837	20807	16240	292	10,6	21	1	1,6	38,1	20	25,7	5	1,0	0,1		6	6	10	
	40N	3,9	206		20	112	15,0	1558	132	1512	6112	5170	884	33,5	7	1	1,1	4,7	6	11,8	28		0,3	2,1	9	14	6	
	40M	7,0	84	13	63	95,3	13,9	2582	37	2487	10471	10910	443	13,8	37	4	0,8	13,9	18	172,0	18	1,2	0,4		9	14	9	
	40E	5,4	55	12	79	62,6	6,4	2119	34	2276	9317	7650	259	8,3	26	29	1,2	37,2	24	21,2	4	1,1	0,2	0,3	9	8	12	
	41	6,2	226		90	79,0	5,4	1625	47	2577	8470	6700	1.970	66,4	27	2	1,5	24,5	24	7,4	13	1,1	0,1		5	11	11	
	#13	4,1	560		38	47,1	11,9	1186	70	1339	5656	4830	5.520	177	17	3	0,7	13,9	14	22,8	34	0,7	0,3	1,2	6	12	16	
	Hola 8																											
	# 2	72,2	4	143	23	447	40,9	24020	2	21740	35737	40330	2	4,1	25	1	1,7	4,2	5				1,5	0,4	6	73	13	
	# 5	137,0	8	161	20	392	67,4	23860	9	15630	50838	61830	1	0,2	69	2	0,6		4				0,3	0,6	7	138	18	

3.3.3. Líkanreikningar

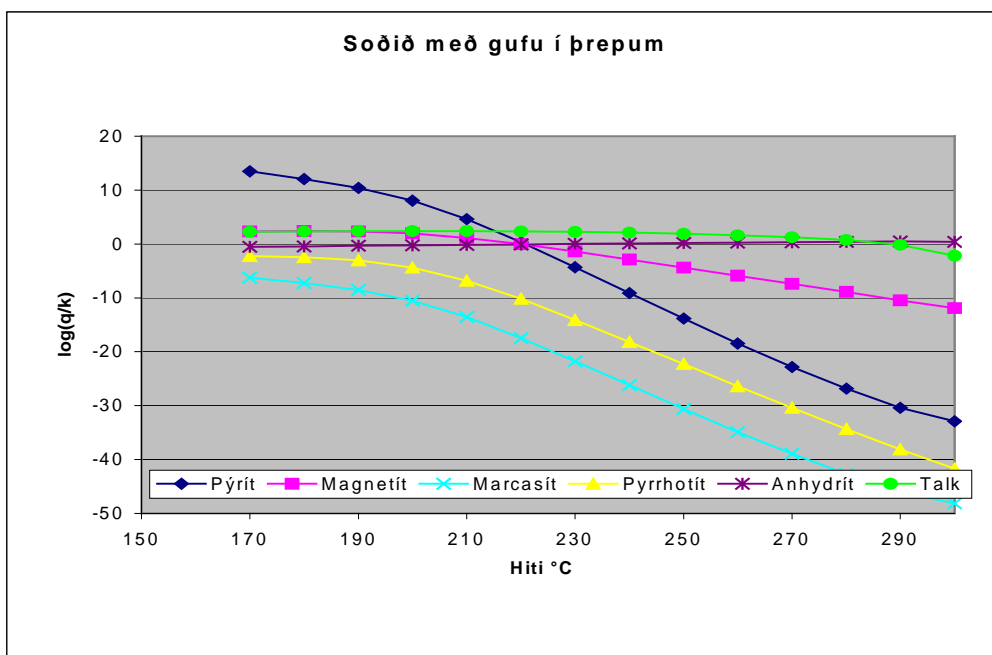
Grímur Björnsson (1998) hefur sýnt fram á suðu í holu 9 frá yfirborði og niður í 900 m dýpi, en þar fyrir neðan taldi hann að ekki syði í kerfinu. Í forritinu HOLA (Grímur Björnsson o.fl. 1993) var hermt eftir holu 9 við tvenns konar aðstæður (tafla 19). Í fyrra tilfellinu er toppþrýstingurinn hafður 30 bar-a og rennsli 80 kg/s. Við þessar aðstæður myndi suða hefjast á um 1000 m dýpi. En í seinna tilfellinu er toppþrýstingurinn hafður 43 bar-a og rennslið 30 kg/s og myndi þá suða hefjast við u.þ.b. 670 m dýpi.

Tafla 19. Útreiknuð gildi á suðuborði við ákveðinn þrýsting og afl (forritið HOLA; Grímur Björnsson o.fl. 1993).

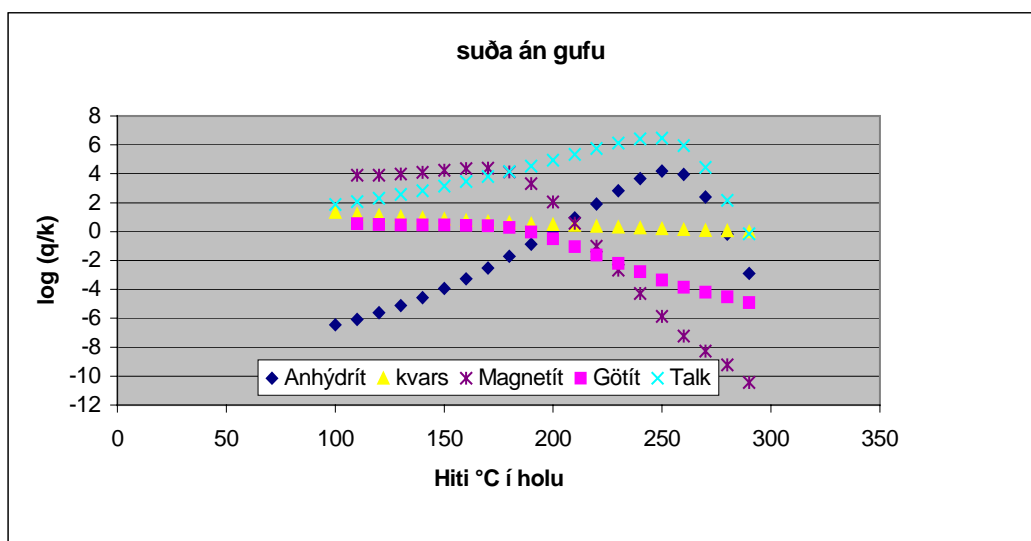
Æðar	dýpi (m)	afl (kg/s)	vermi (kJ/kg)	þrýstingur (bar-a)	suðuborð (m)
Yfirborð	0	30	1290	43	
Ein æð	1400	30	1304	129	670
Yfirborð	0	80	1290	30	
Ein æð	1400	80	1304	107	1000

Forritið WATCH (Stefán Arnórsson o.fl., 1982; Jón Örn Bjarnason, 1994) var notað til að reikna samsetningu borholuvökvans er hann stígur upp og sýður, og var sýni 940057 notað í reikningana. Efnasamsetning vökvans var fyrst reiknuð við 300°C, en síðan hermt eftir suðu allt niður í 170°C, í 10°C þrepum, en hiti við holutopp er um 250°C. Í þessum reikningi var gert ráð fyrir því að gufa og vatn fylgist að. Forritið reiknar jónavirknimargfeldi Q og leysnimargfeldi K fyrir allmargar steindir svo sem málmsteindirnar pyrrhotít, pýrít, markasít, götít, magnetít og reyndar miklu fleiri steindir, og er mettunarstig log (Q/K) nokkurra steinda sýnd á mynd 24. Steindirnar á mynd 24 voru valdar með hliðsjón af því að útfellingar sem greinst hafa í holu 9 eru flestar súlfíð. Auk þeirra voru anhydrít (CaSO₄) og talk (Mg₆(Si₈O₂₀)(OH)₄) valin með tilliti til þess að anhydrít fannst í holu 8 og einhvers konar magnesíumsilíkat, en talk er vatnað magnesíumsilíkat. Pyrrhotít, götít og markasít ná ekki mettun, en pýrít og magnetít skriða rétt yfir núllið við 220°C. Það þýðir að þær ættu ekki að falla út í holunni þar sem hiti við holutopp er um 250°C. Pyrrhotít finnst í leiðslu frá holu 9. Anhydrít og talk eru rétt yfir mettunamörkunum. Þessar steindir hafa ekki fundist í holu 9 en mikið magn af talki fannst í mjóum leiðslum fyrir aftan skiljustöðina þegar þær voru hreinsaðar sumarið 2001. Jón Örn Bjarnason (1984) var áður búinn að sýna fram á að ólíklegt væri að kalsít myndi falla út við þrýsting 40 bar-a og 250°C hita, en reikna mætti með að kísill félli út við þrýsting lægri en 10 bar-a.

Til hliðsjónar er sýnd á mynd 25 niðurstaða um hvað myndi gerast ef þessi sami vökví væri soðinn og gufan fjarlægð jafnóðum. Þar kemur fram að anhydrít og talk myndu falla út í holunni og í a.m.k. nokkra tugum metra í leiðslunni að skiljustöðinni. Magnetít ætti líka að finnast í leiðslum að skiljustöð en ekki í holunni sjálfri. Ekki er talið líklegt að svo mikil afgangur verði í holunni, en þessi tvö tilfelli ættu að spanna ystu mörk þeirra aðstæðna sem verða.



Mynd 24. *Mettun ýmissa steinda í vökva frá holu 9 við suðu í þrepum frá 300°C niður í 170°C, gufa ekki skilin frá.*



Mynd 25. *Mettun ýmissa steinda í vökva frá holu 9 við suðu í þrepum frá 300°C niður í 170°C, gufa skilin frá.*

Forritið WATCH reiknar jafnvægi fyrir tiltölulega fáar steindir. Því var forritinu SOLVEQ (Spycher og Reed 1990) einnig beitt, en það inniheldur upplýsingar um mun fleiri steindir og snefilefni.

SOLVEQ forritið getur ekki soðið vökvann eins og WATCH sem sýður hann og breytir þar með pHi, en það hefur afgerandi áhrif á útfellingu sumra súlfíða. Í SOLVEQ má hins vegar breyta pH handvirkt en það var ekki gert er sýni 940057 var keyrt í SOLVEQ. Forritið var látið reikna saman vatn og gufu við 230 til 280°C og finna þær

steindir sem gætu fallið út við þessar aðstæður. Steindir þær sem náðu mettunarmörkunum og gætu því hugsanlega fallið út eru hematít, magnetít, pýrít, pyrrhótít, talk og minnesótít (= járn talk $(\text{FeMg})_3\text{SiO}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_4$). Þessar steindir voru rétt yfir mettunarmörkunum. Í þessu samhengi má benda á að efnasamsetning útfellinga í holu 8 benti til að þær væru einhvers konar blandsteind af talki og minnesótíti (Hrefna Kristmannsdóttir 1984). Forritið CHILLER (Spycher og Reed 1992) sýður og blandar vökva við hvaða aðstæður sem er, en því miður hefur ekki gefist tími til að nota það forrit.

Til að nota þessi forrit og til að segja fyrir um hvaða steindir geti fallið út úr borholuvökva holu 9, þarf efnagreining á borholuvökvanum að ná til snefilefna eins og til dæmis Zn, Cu og Pb. Þessi snefilefni eru í verulegu magni í útfellingunum en lítil gögn eru hins vegar til um þessi snefilefni í borholuvökvanum.

Hitamunur á djúpvatni holu 8 og holu 9 er aðeins um 15°C og út frá samsetningu borholuvökva, sem er mjög svipuð, er ekki ólíklegt að svipaðar eða sömu útfellingar myndist. Því má ætla að anhýdrít hafi einnig fallið út í holu 9 í um 1000 m við suðuborð.

Samspil efnastyrks borholuvökvens, hitastigs og þrýstings ákvarðar hvað og hvort eitthvað fellur út í borholu. Efnasamsetning djúpvökvens hefur verið mjög stöðug í gegnum árin (Jón Örn Bjarnason 1998), hitastigið lítið breyst og þrýstingurinn neðst í holunni verið stöðugur (Grímur Björnsson 1998). Því bendir allt til þess að það sé holutoppþrýstingurinn sem stjórnar hraða og að hluta til magni útfellinganna. Þannig má nota holutoppþrýstinginn til að stjórna hvar falli út í holunni og jafna út útfellingarnar þannig að ekki nái að myndast tappi á einum eða tveimur stöðum. Það er því nauðsynlegt að fylgst sé reglulega með þrýstingnum eins og nú er gert og er til mikilla hagsbóta. Eins er nauðsynlegt að við hreinsun leiðslna sé starfsmaður með kunnáttu við að taka útfellingasýni, en taka þarf útfellingasýni þannig að hægt sé að greina hvað falli út fyrst o.s.frv.

Ekki hefur verið farið yfir vinnslusögu holu 8 til samanburðar við vinnslusögu holu 9 til að meta hvort að útfelling hafi hafist fyrr í holu 8 en holu 9. Toppþrýstingurinn í holu 8 var ætíð hafður lægri en í holu 9 og er því ekki ólíklegt að suðuborð í holu 8 hafi ætíð verið neðar en í holu 9. Á móti kemur að vísu að innstreymishiti í holu 8 er lægri en í holu 9. Svo lágur holutoppþrýstingur í langan tíma getur leitt til verulegra útfellinga miðað við niðurstöður líkanreikninga.

4. ÖNNUR SVÆÐI

Útfellingar súlfíðs úr borholuvökva eru þekktar á nokkrum jarðhitasvæðum. Má þar nefna Parísardældar lághitasvæðið (Criaud og Fouillac, 1989) og háhitasvæði eins og Milos, Grikklandi (Karabelas et al., 1989, Andritsos og Karabelas, 1991), Salton Sea (Skinner et al., 1967, Gallup et al., 1990), Broadlands-Okaaki Nýja Sjálandi (Hedenquist, 1990), Fushime, Kyushu Japan (Akaku 1990, Akaku et al., 1991) og Djibouti á norðurströnd Austur-Afríku (Virikir-Orkint, 1990). Það sem er sameiginlegt háhitasvæðunum er að borholuvökvinn er mjög saltur, hitastig hátt og útfellingar eins og járn-silíkköt eru í meiri hluta og málmsúlfíð í minni hluta.

Lýst verður stuttlega tveimur svæðum, á öðru er vökvinn mjög saltur, Salton Sea, hitt er Fushime svæðið í Japan, sem er öllu líkara Reykjanessvæðinu, með seltu svipaða og í sjó.

4.1. Salton Sea jarðhitasvæðið

Vökvinn í Salton Sea jarðhitasvæðinu í Kaliforníu er mun saltari en vökvinn í Reykjanessvæðinu. Styrkur aðalefna er stærðargráðu hærri en á Reykjanesi og styrkur snefil-efna og málma allt að þremur stærðargráðum hærri eins og sýnt er í töflu 2. Hitinn er á bilinu 230–360°C og borholuvökvinn er talinn vera í jafnvægi við fylki súlfíðsteinda í jarðhitageyminum (Skinner et al. 1967). Hann inniheldur aðallega Na (43,000 ppm á móti 10,000 á Reykjanesi), K (10,000 ppm á móti 1400 á Reykjanesi), Ca (20,000 ppm á móti 1600 á Reykjanesi) og Cl (120,000 ppm á móti 20,000 á Reykjanesi). Málmanir Pb, Cu, Fe og Zn eru til staðar í mun minna magni (frá 50 til 300 ppm) en samt margfalt meira en á Reykjanesi (frá 0,002 upp í 0,2 ppm). Gasfasinn er nær eingöngu CO₂ (6200 ppm). Upplest efni eru á bilinu 15 til 30% af þunga (Gallup et al. 1990; Gallup 1992).

Þótt þessi mikli munur sé á efnasamsetningu Salton Sea borholuvökvans og þess á Reykjanesi er samsetning útfellinga mjög lík. Í Salton Sea falla út allt að 2 til 3 tonn á mánuði af málmríki - kísilútfellingu (Skinner et al. 1967). Útfellingarnar eru svartar til brúnleitar, harðar og glerkenndar og samkvæmt lýsingu svipar þeim mjög til útfellinganna í holu 9 Reykjanesi. Hér er að mestu um að ræða járn-silíkköt (þ.e. vötnuð silíkköt ásamt járnnoxíðum) og kísli, sem falla aðallega út í leiðslum á yfirborði þar sem hiti er lægri en 200°C. Miklu minna er um súlfíð eins og sinkblend, blýglans, bornít, pyrít, pyrrhotít og eirkís, allt saman súlfíð. Útfellingahraði þessara steinda er talinn vera < 1 sm/ári (Gallup et al. 1990; Gallup 1992). Kísil og járnhýdroxíð er aðallega að finna framan og aftan við skiljubúnaðinn, og í holutoppum eru útfellingar eins og blýglans og kalsít upp í fáeina sentimetra á þykkt (McKibben et al. 1990). Súlfíðin falla út í fyrsta lagi vegna þess að hiti borholuvökvans lækkar og veldur minnkun á leysni steindanna og í öðru lagi vegna suðu, en þá fer CO₂ í gufufasa og veldur þannig hækkun á pH í borholuvökvannum (Owen 1975; Gallup et al. 1990).

McKibben o.fl. (1990) fundu út að magnetít var aðalútfellingin í leiðurunum og var þykkt þess upp í nokkra sentimetra þar sem borholuvökvinn byrjaði að sjóða á 500 til 600 m dýpi.

Eins og vel er hægt að ímynda sér, er gífurlegt útfellingavandamál á Salton Sea svæðinu og var stofnað sérstakt fyrirtæki (Geothermal Loop Experimental Facility) við Salton Sea á árunum 1975 til 1979 til að rannsaka útfellingar og koma með tillögur um úrbætur

(Featherstone et al. 1995). Niðurstöður urðu þær að nýting vökva sem innihéldi allt að 300.000 ppm af uppleystum efnum væri eitt af óleystum verkefnum jarðhitafræðinnar.

Kísilútfellingum er stjórnað með pH (HCl) og hitastigi (Featherstone og Powell 1981) og tilraunir voru gerðar með lækkun á pH úr 6 í 4–5 til að minnka súlfíðútfellingahraðann. Útfellingahraðinn minnkaði 2 til 20 sinnum, mest við hátt hitastig. Þetta leiddi aftur á móti til útfellingar á flúoríti (kalsíumflúoríði) og baríti (baríumsúlfati), sem féllu út um leið og myndlaus kísill þegar og hiti lækkaði í blæstri (Harrar et al. 1979). Auk stjórnunar pH borholuvökvens, hafa úrlausnir eins og “kristöllumarhreinisar” (fella út kristalla með hjálparefnum (hvötum)) og “line mining” reynst þeim vel og lengt tímenn á milli þess sem niðurdælingarholur eru endurboraðar. En það eru aðferðir eins og vöktun á þrýstingsbreytingum og reglulegt eftirlit með leiðslu og betri aðferðir við hreinun, t.d. svínun (pigging techniques) sem gilda í dag (Stock 1990; Arata et al. 1996).

4.2. Fushime jarðhitasvæðið

Fushime jarðhitasvæðið í Kyushu, Japan hefur verið rannsakað af olúfélaginu JAPEX frá árinu 1977. Að minnsta kosti 10 borholur hafa verið boraðar og er dýpt þeirra á bilinu 755–2600 m. Samsetning efna í jarðhitavökvanum, sem er tvífasa, er til komin vegna samspils sjávar og bergs. Klóríðinnihald rennisins úr holunni er á bilinu 15.000 til 33000 mg/l með vermi 1000 til 2400 kJ/kg, hitinn um og yfir 300°C (Akaku 1990, Akaku et al. 1991). Einkenni djúpvökvens eru eftirfarandi: Klóríðstyrkur er 10.000–18.000 mg/l, Mg og SO₄ styrkur er mjög lágur miðað við sjó, K, Ca, SiO₂, Mn, Fe, Zn og Pb styrkur er miklu hærri en í sjó. Gasið er mest CO₂ og þá H₂S (sjá töflu 2).

Útfellingum var safnað úr leiðslum frá átta holum á yfirborði og var misjafnt hvers konar útfellingar greindust eftir því hvar þær var að finna. Algengustu útfellingarnar í tveggja fasa leiðslum, þ.e. í leiðslum næst borholunni (þrýstingur hár og hiti hár), voru blýglans, sinkblendi og stundum pyrrhótít. Efnagreining sýndi mikið af Pb, Zn, S, Cu og Sb, en SiO₂ styrkur var mjög lágur. Myndlaus kísill var algengastur í skiljum, hljóðdeyfum, heitavatsleiðslum og niðurdælingarholum. Skýringar á útfellingunum voru eftirfarandi: Fljótlega eftir að suða hefst, rýkur CO₂ úr vökva í gufu og leiðir til hækkaðs pH. Við það byrja súlfíðsteindirnar að falla út og mynda þunna húð innan á leiðslunum, og mynda þar með ryðvarnarhúð á leiðslurnar. Við áframhaldandi suðu verður metnun á myndlausa kíslinum og hann byrjar að falla út með súlfíðunum (Akaku 1990).

Anhýdrít (CaSO₄) umlukt af blýglansi og sinkblendi finnst á 1000 m dýpi, ásamt pyrrhótít og magnetíti, í a.m.k. einni holu. Einsleitir vökvaínnlyksuhiti var á bilinu 245–260°C. Anhýdrít er talið falla út vegna blöndunar á köldu súlfatríku vatni við heitt súlfatsnautt vatn.

Í viðræðum við sérfræðinga Orkustofnunar árið 1997 lýstu sérfræðingar Japex yfir áhyggjum vegna útfellinga á svæðinu og óskuðu eftir samvinnu við Íslendinga til að leysa þessi vandamál (Hrefna Kristmannsdóttir, munnlegar upplýsingar).

5. FRAMHALDSRANNSÓKNIR

1. Fara þarf nánar yfir gögn um vinnslu holna 8 og 9 og bera saman vinnslusögu þeirra með tilliti til hvenær útfellingar urðu. Gæti þá fengist mat á hvort hagkvæmt sé að reka holuna við mikið rennsli, ef útfellingahraðinn fer ekki yfir ákveðin mörk.
2. Leitast verður við að afmarka þann vinnsluþrýsting sem unnt er að reka holurnar við án þess að til mikilla útfellinga komi.
3. Æskilegt væri að rannsaka frekar útfellingasýni sem tekin voru sumarið 2001.
4. Mjög gagnlegt væri að rannsaka lagskiptingu sem fram kemur í nær hverju sýni af útfellingu. Slík rannsókn gæti skýrt hvort lagskiptingin stafar af suðupúlsum í jarðhitakerfinu eða breytingu í vinnslu.
5. Einnig þarf að gera fleiri magnbundnar efnagreiningar á útfellingunum til samanburðar m.a. við XRD-greiningu.
6. Mjög æskilegt væri að rannsaka nánar útfellingarnar við skiljustöðina, en þær hafa ekki verið rannsakaðar til hlítar.
7. Við næstu efnagreiningu á borholuvökva er nauðsynlegt að greina, auk aðalefna, snefilefni, einkum málma því þá fyrst er hægt að gera líkanreikninga á því hvað gerist í holunni er vökvinn sýður.
8. Verði holur á svæðinu hreinsaðar er lagt til að vandað verði til sýnatöku á útfellingum og hún fari fram undir umsjón jarðfræðings.
9. Einnig er lagt til að gera jafnvægis- og líkanreikninga á myndunarskilyrðum járn-, kopar-, sink-, blý- og silfursúlfiða sem vitað er að fallið hafa út í holutoppi og í lögnum frá holu 9.
10. Jafnframt er lagt til að gerðir verði líkanreikningar á jafnvægismyndun steinda af svipaðri gerð og járn/magnesiúmsilikatútfellingarnar sem myndast hafa niðri í borholunum á Reykjanesi. Útfellingarnar eru myndlausar (ókristallaðar). Myndunarskilyrði þessara útfellinga eru ekki þekkt, og litlar rannsóknir hafa verið gerðar á þeim enn sem komið er.

6. SAMANTEKT

Skýrslan fjallar að mestu um rannsóknir á útfellingum úr yfirborðslögnum frá holu 9, en áður er gefið yfirlit yfir efnasametningu djúpvökva í holum 8 og 9 og rakin saga holna 8 og 9.

Helstu niðurstöður eru eftirfarandi: Samanburður á borholuvökva 8 og 9 sýnir að um mjög svipaðan vökva er að ræða, djúphiti í holu 8 er um 275°C en 290°C í holu 9.

Safnað var um 30 útfellingasýnum á um 150 m kafla úr leiðslum frá holunni. Rannsóknir sýnda að flokka megi útfellingarnar niður eftir því hvar þær eru teknar. Flokkarnir eru þannig; (1) sýni frá holutopp, (2) sýni fyrir blendu (3a) sýni strax eftir blendu og fáeinir metrar þaðan frá (u.þ.b. 8 m), (3b) sýni eftir blendu, lengra frá og (4) sýni við skiljustöð.

(1) Útfellingar í holutoppi eru allt að 5 mm að þykkt og í öðru lagi mylsna sem var á 2" röri niður úr holutoppi var mylsna sem hrundi af þegar rörið kólnaði. Útfellingarnar voru tvenns konar, annars vegar eru svartar duftkenndar útfellingar, mjög fin-kristallaðar, og í hins vegar gyllt súlfíð. Í XRD greiningum reyndist þetta vera aðallega sink- og koparsúlfíð, en auk þess kísil- járn- og magnesíumoxíð. Kísillinn mælist um 27%, járn um 21% og magnesíum um 7%. Af súlfíðunum reiknast mest af sinksúlfíði 21%, og koparsúlfíð um 9%, en blýsúlfíð um 1%.

(2) Að blendu mynda útfellingarnar örþunn lög mest nokkra sm á þykkt. Eru þetta nær eingöngu súlfíð, sinkblendi og eirkís, þau sömu og er að finna í holutopp. Finnanlegt er að útfellingar innihalda þung efni. Einnig vottar fyrir pyrrhótíti og leir. Ekki var gerð heildarefnagreining á sýnum frá þessum stað en trúlega er samsetning útfellinganna þarna sú sama og þeirrar sem fannst föst í holutoppi en þar er kísillinn 5%, járn um 30% og magnesíum um 1%. Hér mælast súlfíðin rúm 60%; sinksúlfíð 31%, koparsúlfíð um 30% og blýsúlfíð um 4%.

(3a) Útfellingarnar eru mestar eftir blendu þar sem þrýstingurinn fellur snögg, en minnka er fjær dregur blendu. Á um 8 m kafla frá blendu voru rörin stútfull af svörtum mishörðum útfellingum, en miðja útfellinganna er morkin og laus í sér. Útfellingarnar eru svartar, mjög harðar og lagskiptar næst röri. Enn er greinilegt að útfellingarnar innihalda þung efni. Eftir blendu eru þetta að mestu leyti ókristallaður kísill og járn auk súlfíðanna. Lagskiptingin helst a.m.k. 150 metra frá blendu. Steindasamsetningin er oft flókin, en aðalega eru þetta súlfíð, sem eru vel kristölluð. Sinkblendi, blýglans og eirkís/koparkís eru algengastar ásamt ókristölluðu mjög kísilríku járnnoxíði. Kísillinn mælist um 50%, járníð um 6% og magnesíum um 0,3%. Sinksúlfíð er um 20%, koparsúlfíð 10% og blýsúlfíð er hér mest um 4%.

(3b) Er fjær dregur blendu minnkar magn útfellinganna allverulega, þannig að einungis eru útfellingar neðst í rörunum, og í um 100 m fjarlægð frá blendu er allt að 15 sm þykkar lagskiptar útfellingar. Útfellingarnar eru aðeins nokkrir sm að þykkt um 150 m frá blendu og litur þeirra orðinn ljósbrúnn. Fyrst eru útfellingarnar mjög harðar og lagskipting greinanleg, ýmist svört, grá og mött lög fyrst til að byrja með, en í um 100 m fjarlægð verða sýnin ljósari, lagskipt, frauðkennd og mun léttari en áður. Fjölbreytni steinda eykst, en kristöllun minnkar. Enn greinast sömu súlfíðútfellingar, en í mun minna magni en áður, og súlfíðin hætta að mestu að falla út í um 150 m fjarlægð frá blendu. Auk þess greinist ópall (ókrystallaður kísill), sulfat- og klóríð-steindir og sölt. Um 30 metrum frá blendu er kísillinn 66% og eykst upp í 93% neðst í stóru

útfellingunni sem fannst í a.m.k. 70 m fjarlægð frá blendu, járn mælist um 5% og fellur í 1,5% neðst í stóru útfellingunni og magnesíum er um 0,5%. Á þessu lengdarbili lækkar sink-súlfíð úr 11% í rúm 1%, koparsúlfíð úr tæpum 5% í sama sem ekki neitt og blý-súlfíð frá 2% í sama sem ekki neitt.

(4) Við skiljustöð er lagskipting greinileg, útfellingarnar léttar, ljósar og frauðkenndar. XRD-greiningar benda til lítillar kristöllumunar en helst greinist sinkblendandi og sölt. Kísill er um 83%, járn um 6% og magnesíum um 0,6%. Súlfíðin hér eru um 1%.

Gull mælist mest í holutoppi af þeim stöðum sem sýni voru greind. Styrkur þess er þar á bilinu 90-150 ppm og einnig var hann um 90 ppm eftir blendu, en minnkar eftir það. Silfur mælist 400 ppm í holutoppi; og strax eftir blendu, en lækkar niður í 200 ppm eftir 30 til 40 m. Mest er af málmunum sinki, allt upp í 20%, en fellur niður í 12% strax eftir blendu. Þá kemur kopar, einnig með 20% en fellur niður í 6% eftir blendu. Mest mælist af blýi, um 3% strax eftir blendu. Aðrir málmar mælast í minna mæli, en í þó nokkru magni miðað við útfellingar annars staðar hér á landi.

Ekki voru til sýni af útfellingum úr sjálfri borholu 9, þannig að hægt væri að skilgreina útfellingar í holunni. Útreikningar sýndu aftur á móti að súlfíð falla út í holunni og að anýdrít fellur sennilega út við suðu er hefst í 1000 til 700 m dýpi. Steindirnar falla trúlega út frá því að suða hefst og alla leið að skiljustöð.

Stjórna má hvar steindirnar falla út með því að breyta holutoppsþrýstingnum og mynda þannig jafnt lag af útfellingum í holunni en ekki útfellingarþykkildi, og lengja þannig líftíma holunnar.

Búið er að skilgreina útfellingarnar vel fyrir blendu og næstu 150 m frá blendu. Hugsanlega má forðast þær en í versta falli er hægt að taka rörin fyrstu 10 m eftir blendu og setja ný á nokkra ára fresti. Aftur á móti er ekki búið að rannsaka lagskiptingarnar í þessum útfellingum og væri það mjög æskilegt, því hugsanlegt er að lagskiptingin sé vegna suðupúlva eða öllu líklegra vegna breytinga í vinnslu.

Útfellingarnar við skiljustöð eru enn ekki nægjanlega rannsakaðar með tilliti til niðurdælingar á þessum vökva og til eru fleiri sýni m.a. frá lokahúsi sem rannsaka má nánar.

Skráning á renni, holutoppsþrýstingi og öðrum eiginleikum er snerta nýtingu holunnar er nú reglubundin. Með því er mjög líklega hægt að sjá mun fyrir hvort holuna eða leiðslurnar þurfi að hreinsa. Nú á því ekkert að vera því til fyrirstöðu að fara í gegnum vinnslugögnin og bera þau saman við aðrar mælingar og athuga t.d. þannig hvort spá megi fyrir um hugsanlegar útfellingamyndanir í holu 9.

Ráðlagt er að jarðfræðingur sé viðstaddur er holan eða leiðslurnar eru hreinsaðar til að taka útfellingasýni og setja þau í samhengi við aðstæður. Sýnataka sjálf skiptir verulegu máli í túlkun allra gagna er snerta útfellingasteindirnar. Eins þarf við næstu efnagreiningu á borholuvökva að greina, auk aðalefna, snefilefni, einkum málma, því þá fyrst er hægt að rannsaka hvað gerist í holunni er vökvinn sýður. Einnig þarf að gera fleiri magnbundnar efnagreiningar á útfellingunum til samanburðar m.a. við XRD greiningu.

ÞAKKARORÐ

Höfundur þakkar Hrefnu Kristmannsdóttur, Halldóri Ármannssyni og Jóni Erni Bjarnasyni fyrir ómetanlega aðstoð við gerð þessarar skýrslu, svo og Steinunni Hauksdóttur fyrir yfirlstur og þarfar ábendingar. Nielsi Óskarssyni, Karli Grönvold, Norrænu Eldfjallastöðinni og Sigurði Steinþórssyni Háskóla Íslands þakkar höfundur ómetanlega aðstoð við þessar rannsóknir. Verkefnisstjóri var Sverrir Þórhallsson og þakkar höfundur alla aðstoð hans.

7. HEIMILDIR

- Akaku K. 1988: Geochemistry of mineral deposition from geothermal waters: Deposition processes of common minerals found in various geothermal fields og case study in the Fushime geothermal field. *Cinestsu*, 25: 154–171. Á japönsku.
- Akaku K. 1990: Geochemical study on mineral precipitation from geothermal waters at the Fushime field, Kyushu, Japan. *Geothermics*. 19, No. a5: 455–467.
- Akaku K., Reed M. H., Yagi M., Kai K. og Yasuda Y. 1991: Chemical og physical processes occurring in the Fushime geothermal system, Kyushu, Japan. *Geochemical Journal*, 53: 315–333.
- Andritsos N. og Karabelas A.J. 1991: Sulfide scale formation and control: the case of lead sulfide. *Geothermics*, 20, No. 5/6, 343–353.
- Arata, E., Erich, R. og Paradis, R. 1996: Recent innovations in pigging technology for the removal of hard scale from geothermal pipelines. *Geothermal Resources Council Bulletin*, 25, No. 8: 307–312.
- Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson 1992: Hola RnG-9 á Reykjanesi. Mælingar í mars 1992. Orkustofnun, greinargerð BS/GrB-92/01, 5 s.
- Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson 1993: Hola RnG-9 á Reykjanesi. Mælingar í september 1993. Orkustofnun, greinargerð BS/GrB-93/01, 10 s.
- Benedikt Steingrímsson og Grímur Björnsson 1994: Hreinsun holu RnG-9 á Reykjanesi haustið 1993. Orkustofnun, greinargerð BS/GrB-94/01, 8 s.
- Criaud, A. og Fouillac, C. 1989: Sulfide scaling in low enthalpy geothermal environments: A survey. *Geothermics*, 18, No.1/2: 73–81.
- Ellis, A. J. og Mahon, N. A. J. 1977: Chemistry and Geothermal Systems. Academic Press, New York, 392 s.
- Featherstone J. L., og Powell D. R. 1981: Stabilization of highly saline geothermal brines. *Journal of petroleum technology*, April, 727–734.
- Featherstone J. L., Butler S. og Bonham E. 1995: Comparison of crystallizer reactor clarifier og pH MOD process technologies used at the Salton Sea geothermal field. *Proceedings of the World Geothermal Congress*, 4, 2391–2396.
- Freysteinn Sigurðsson, Hrefna Kristmannsdóttir, Sverrir Þórhallsson 20–09–1995 *Freshwater and seawater on Reykjanes and the Reykjanes Peninsula* Orkustofnun, greinargerð FS-HK-SÞ-95/09 9 s.

- Gallup D. L. 1992: Recovery of silver-containing scales from geothermal brines. *Geothermal Resources Council Transactions*, 16, 351–355.
- Gallup D.L., Andersen G.R. og Holligan D.1990: Heavy metal sulfide scaling in a production well at the Salton Sea geothermal field. *Geothermal Resources Council Transactions* 14, part II, 1583–1590.
- Grímur Björnson 1998: *Jarðhitakerfið á Reykjanesi. Mat á innra ástandi og afkastagetu* Orkustofnun OS-98047 30 s.
- Grímur Björnsson, Þórður Arason og Guðmundur S. Böðvarsson 1993: The wellbore simulator HOLA, version 3.1, 36 s.
- Harðardóttir, V., Kristmannsdóttir, H. & Ármannsson, H. 2001: Scale formation in wells RN-9 and RN-8 in the Reykjanes geothermal field Iceland. Proceedings of the tenth international symposium on Water-Rock Interaction, WRI-10, Villaimius, Italy, ed. Cidu R., vol.2, 851–854.
- Harrar, J. E., Otto, C. H. Jr., Deutscher, S. B., Reyon, R. W. og Tardiff, G. E. 1979: Studies of brine chemistry, precipitation of solid, and scale formation at the Salton Sea geothermal field. Lawrence Livermore Laboratory, 17 s.
- Hedenquist J.W. 1990: The thermal and geochemical structure of the Broadlands-Ohaaki geothermal system, New Zealand. *Geothermics*, 19, 151–185.
- Hjalti Franzson 1990: Verðmætir málmar. Óbirt gögn á Orkustofnun ROS.
- Hjalti Franzson, Hrefna Kristmannsdóttir og Sverrir Þórhallsson 1995: Reykjanes high-temperature field. Orkustofnun, report HF/HK/Sp-95/02.
- Hrefna Kristmannsdóttir 1979: Athugun á útfellingum í holu 8 á Reykjanesi. Orkustofnun Jarðhitadeild, HK-79/01, 8 s.
- Hrefna Kristmannsdóttir 1981: Clay-like minerals formed in a geothermal brine in the Reykjanes high-temperature geothermal system Iceland. Abstracts from the 7th Int. Clay Conf. Bologna and Pavia, 161-162.
- Hrefna Kristmannsdóttir 1984: Chemical evidence from Icelandic geothermal systems as compared to submarine geothermal systems. From Hydrothermal processes at seafloor spreading centers. Edited by Rona P.A, Bostrom K. Laubler L., and Smith K.L. Plenum Publishing Corporation, 291–320.
- Jón Örn Bjarnason 1984: Efnasamsetning jarðsjávar og gufu ú holu RnG-9. Orkustofnun, OS-84049/JHD-13, 14 s.
- Jón Örn Bjarnason 1987: Reykjanes, niðurstöður efnagreininga nokkurra sýna. Orkustofnun, OS-87026/JHD-17 B, 15 s.
- Jón Örn Bjarnason 1994: The speciation program WATCH, version 2.1. Orkustofnun, Reykjavík, 7 s.
- Jón Örn Bjarnason 1998: Jarðsjór og gufa á Reykjanesi: Mat á efnaflæði úr borholum. Orkustofnun, greinargerð, JÖB-98/01
- Jón Örn Bjarnason 2002: Reykjanes. Efnasaga þriggja áratuga. Í vinnslu.
- Karabelas A.J., Andritsos, N., Mouza, A., Mitrakas, M., Vrouzi, F. og Christanis, K. 1989: *Geothermics*, 18, No.1/2: 169–174.

- Kristján Sæmundsson 1997. Hveririrnir á Reykjanesi og fleira þeim tengt. Óbirt handrit, 6 s.
- Lindal B. 1989: Solids deposition in view of geothermal application. *Geothermics*, 18, No. ½: 207–216.
- Lonker S. W., Franzson H. & Kristmannsdóttir H. 1993. Mineral-fluid interactions in the Reykjanes and Svartsengi geothermal systems, Iceland. *Am. J. Sci.*, 293: 605–670.
- McKibben M.A., Williams A.E. og Hall G.E.M. 1990: Solubility and transport of platinum-group elements and Au in saline hydrothermal fluids: Constraints from geothermal brine data, *Economic Geology*, 85: 1926–1934.
- Owen L. B. 1975: Precipitation of amorphous silica from high-temperature hypersaline geothermal brines. Lawrence Livermore Laboratory, Rept. UCRL-51866, 1–20, (June 1975).
- Ólafsson J. og Riley J. P. 1978: Geochemical studies on the thermal brine from Reykjanes (Iceland). *Chem. Geol.*, 21: 219–237.
- Ragna Karlsdóttir 1997: *TEM-viðnámsmælingar á utanverðum Reykjaneskaga* Orkustofnun OS-97001 63 s.
- Skinner B.J., White D.E., Rose H.J. og Mays R.E. 1967: Sulfide associated with the Salton Sea geothermal brine. *Economic Geology*, 62: 316–330.
- Spycher N.F. og Reed M.H. 1990: User's guide for SOLVEQ: A computer program for computing aqueous-mineral-gas equilibria. Department of Geological Sciences University of Oregon, Eugene, OR, 37 s.
- Spycher, N.F. og Reed, M.H. 1992: User's guide for CHILLER: A program for computing water-rock reactions, boiling, mixing and other reaction processes in aqueous-mineral-gas systems. Department of Geological Sciences University of Oregon, Eugene, OR, 68 s.
- Stefán Arnórsson, Sven Sigurðsson og Hörður Svavarsson 1982: The chemistry of geothermal waters in Iceland. I. Calculation of aqueous speciation from 0°C to 370°C. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46: 1513–1532.
- Stock D.D. 1990: The use of pressure drop measurements to monitor scale build-up in pipelines and wells. *Geothermal Resources Council Transactions*, 14, part II, 1654–1651.
- Sveinbjörn Björnsson, Birna Ólafsdóttir, Jens Tómasson, Jón Jónsson, Stefán Arnórsson og Stefán Sigurmundsson 1971: Reykjanes. Heildarskýrsla um rannsókn jarðhitasvæðisins. Orkustofnun, jarðhitadeild, 172 s.
- Sverrir Þórhallsson OCT 1977: Hóla 8 á Reykjanesi. Greinargerð til undirbúningsfélags saltvinnslu á Reykjanesi Orkustofnun, OS-JHD-7730, 7 s.
- Trausti Hauksson 1981: Reykjanes. Styrkur efna í jarðsjó. Orkustofnun, OS81015/JHD10, 53 s.
- Verkfræðistofan Vatnaskil hf 1993a: Reykjanes. Vinnslueftirlit 1970–1992. Orkustofnun, OS-93011/JHD-06 B, 8 s.
- Verkfræðistofan Vatnaskil hf 1993b: Reykjanes. Vinnslueftirlit júlí 1992 - júlí 1993. Orkustofnun, OS-93043/JHD-23 B, 16 s.

- Verkfræðistofan Vatnaskil hf 1994: Reykjanes. Vinnsluaeftirlit júlí 1993 - júlí 1994. Orkustofnun, OS-94035/JHD-20 B, 15 s.
- Verkfræðistofan Vatnaskil hf 1995: Reykjanes. Vinnsluaeftirlit júlí 1994 - júlí 1995. Orkustofnun, OS-95041/JHD-26 B, 17 s.
- Verkfræðistofan Vatnaskil hf 1996: Reykjanes. Vinnsluaeftirlit júlí 1995 - júlí 1996. Orkustofnun, OS-96042/JHD-27 B, 13 s.
- Verkfræðistofan Vatnaskil hf 1997: Reykjanes. Vinnsluaeftirlit júlí 1996 - júlí 1997. Orkustofnun, OS-97040, 13 s.
- Verkfræðistofan Vatnaskil hf 1998a: Reykjanes. Vinnsluaeftirlit júlí 1997 - júlí 1998. Orkustofnun, OS-98045, 13 s.
- Verkfræðistofan Vatnaskil sf 1998b: Svartsengi. Vinnsluaeftirlit júlí 1997 - júlí 1998. Orkustofnun, OS-98044, 17 s.
- Verkfræðistofan Vatnaskil sf 2000: Svartsengi - Reykjanes. Vinnsluaeftirlit júlí 1999 - júlí 2000. Orkustofnun, OS-2000/062, 36 s.
- Vigdís Harðardóttir, Hrefna Kristmannsdóttir og Halldór Ármannsson 2001: Útfellingar við nýtingu jarðsjávar í holum 8 og 9 Reykjanesi. Orkuþing 2001, María J. Gunnarsdóttir, ritstjóri, 601–606.
- Virkir-Orkint Consulting Group Ltd. 1990: Djibouti. Geothermal scaling and corrosion study. Final Report, 41 s.