



ORKUSTOFNUN  
Jarðhitadeild

Trausti Hauksson, Kemíu sf.  
Sverrir Þórhallsson, Orkustofnun

## KÍSILÚTFELLINGAR ÚR JARÐSJÓ

Áhrif þéttivatnsíblöndunar á magn  
og hraða kísilútfellinga í iðustreymi

Skýrsla um niðurstöður tilrauna í Svartsengi 1994

OS-95011/JHD-01  
Reykjavík, febrúar 1995

Unnið fyrir  
Hitaveitu Suðurnesja



**ORKUSTOFNUN**  
Grensásvegi 9, 108 Reykjavík

Verknr. 630 221

**Trausti Hauksson, Kemíu sf**  
**Sverrir Þórhallsson, Orkustofnun**

# **KÍSILÚTFELLINGAR ÚR JARÐSJÓ**

## **Áhrif þéttivatnsíblöndunar á magn og hraða kísilútfellinga í iðustreymi**

**Skýrsla um niðurstöður tilrauna í Svartsengi 1994**

**OS-95011/JHD-01**

**Reykjavík, febrúar 1995**

**Unnið fyrir Hitaveitu Suðurnesja**

ISBN 9979-827-54-8



## ÁGRIP

Áhrif yfirmettunar á útfellingarhraða kísils í iðustreymi voru könnuð í mismunandi blöndu jarðsjávar, frá háþrýsti- og lágþrýstiskiljum orkuversins í Svartsengi, og þéttivatns frá varmaskiptum.

Blöndurnar voru látnar hringrása í lokuðu stálhylki við ákveðið hitastig og styrkur kísils mældur reglulega. Tilraunirnar voru gerðar við 60, 80, 100 og 120°C.

Jafnvægisstyrkur í jarðsjónum var mældur og reyndist hann lægri en áður hafði verið miðað við í Svartsengi. Eftirfarandi jafna gildir um leysni kísils í jarðsjónum á hitabilinu 60 til 120°C.

$$\log(cs) = 4,13 - 605/T$$

cs: Jafnvægisstyrkur kísils (mg/kg)

T: Hitastig Kelvin (K)

Ekki var hægt að stöðva útfellingu í iðustreymi með því eingöngu að minnka yfirmettun, heldur varð að lækka styrk kísils niður í jafnvægisstyrk, ef koma átti algjörlega í veg fyrir kísilútfellingu. Fyrir niðurdælingu lágþrýstisjávar þarf 52 % íblöndun þéttivatns hið minnsta og er þá miðað við að blandan sé um 90°C heit og má kísilstyrkur þá ekki fara yfir 290 mg/kg.

Útfellingarhraði var mjög háður yfirmettun og var honum best lýst með þriðju gráðu líkingu.

$$dc/dt = k*(c/cs-1)^3$$

c: Styrkur kísils (mg/kg).

t: Tími (klst)

k: Hraðafasti

Hraðafastinn (k) var breytilegur frá 146 til 1929 og var ekki reglubundið samband milli hraða annars vegar og hitastigs, seltu og sýrustigs hins vegar.

Ef miðað er við allt að leyfileg útfelling í niðurdælingarlögnum megi vera 1 mm á ári þá má kísilstyrkur, samkvæmt tilraunaniðurstöðum, vera um 370 mg/kg við 90°C, sem þýðir um 38% þéttivatnsíblöndun, samanborið við 52% ef engin útfelling er leyfð.



## EFNISYFIRLIT

	bls
ÁGRIP .....	3
EFNISYFIRLIT .....	5
TÖFLUSKRÁ .....	5
MYNDASKRÁ .....	5
1 INNGANGUR.....	6
2 FRAMKVÆMD TILRAUNA.....	7
3 NIÐURSTÖÐUR.....	9
3.1 Útfelling og uppleysing kísils .....	9
3.2 Jafnvægisstyrkur kísils .....	12
3.3 Útfellingarhraði kísils.....	15
4 TILLÖGUR.....	18
HEIMILDASKRÁ .....	20
VIÐAUKAR .....	21
TÖFLUSKRÁ VIÐAUKA .....	22
MYNDASKRÁ VIÐAUKA .....	22
VIÐAUKI 1 FELLIHRAÐI KÍSILS.....	23
VIÐAUKI 2 JAFNVÆGISSTYRKUR KÍSILS.....	41

## TÖFLUSKRÁ

### Tafla

2.1 Útfellingartilraunir í Svartsengi .....	8
3.1 Jafnvægistilraunir í Svartsengi.....	13
3.2 Jafnvægisstyrkur kísils.....	14
3.3 Hraðafastar þriðju gráðu líkingar.....	17

## MYNDASKRÁ

### Mynd

2.1 Stálhylki með hringdælingu, hitað með olíu.....	7
2.2 Tengingar inn á stálhylki.....	7
3.1 Útfelling kísils úr lágþrýstisjó við 80°C.....	9
3.2 Útfelling kísils úr háþrýstisjó við 120°C.....	10
3.3 Útfelling kísils úr 56% blöndu jarðsjávar og þéttvatns við 80°C.....	10
3.4 Uppleysing kísils við 80°C.....	11
3.5 Jafnvægistilraunir í Svartsengi.....	12
3.6 Samband log(c) og 1/T.....	13
3.7 Jafnvægisstyrkur kísils sem fall af hitastigi.....	14
3.8 Hraðafasti þriðju gráðu líkingar.....	15
3.9 Reiknaður styrkur kísils sem fall af tíma.....	16
4.1 Kísilmettun í Svartsengissjó.....	18

## 1 INNGANGUR

Útfelling myndlauss kísils úr jarðhitavatni og sérstaklega jarðsjó er algengt vandamál í rekstri jarðhitavirkjana. Leysni hans og útfelling hefur því verið mikið rannsökuð á síðustu árum og áratugum. Ein fyrsta rannsókn á útfellingu og fjölliðun kísils í frárennsli frá háhitasvæði á Íslandi var gerð í Bjarnarflagi árin 1972 til 1975 (Stefán Arnórsson 1976). Þær tilraunir voru gerðar með vatn úr lóni sem í rann skiljuvatn frá háhitaborholum. Vatnið var látið kólna hægt og kísilstyrkur mældur.

Kísilútfellingar í jarðsjó í Svartsengi eru vandamál við rekstur orkuversins. Bæði sest kísill í loka og stíflar mælitæki og eins kemur kísilútfelling í veg fyrir að hægt sé að dæla jarðsjónum frá lágþrýstiskiljum niður í jarðhitageyminn til þess að viðhalda þrýstijafnvægi.

Margvíslegar tilraunir hafa verið gerðar með kísilútfellingu í Svartsengi, ýmist í þeim tilgangi að kanna vinnslu hans (Hermann Þórðarson og Þór Tómasson, 1989), eða að hægja á eða stöðva fellingu hans, (Guðmundur Rúnar Guðmundsson 1985, Jón Steinar Guðmundsson 1978, 1983 og Trausti Hauksson 1992).

Nú eru uppi áform um að dæla jarðsjónum niður í jarðhitageyminn í Svartsengi, í bland við þéttivatn frá orkuverinu. Fyrri tilraunir gáfu vonir um að hægt væri að hægja nægilega á útfellingarhraðanum með því að lækka yfirmettunina og e.t.v. einnig sýrustigið. Þær tilraunir voru gerðar í kyrrstæðu vatni og líktu því ekki vel eftir aðstæðum sem vænta má í niðurdælingarlögn, en vitað er af reynslu að iðustreymi hefur mikil áhrif á útfellingu kísils. Rétt þótti því að kanna betur stöðugleika kísils í jarðsjónum með tilraunabúnaði sem þróaður var til þess að kanna útfellingu magnesíum-silíkats úr hitaveituvatni og gaf góða raun í þeim rannsóknum. Í tilraunabúnaðnum er blöndu þeirri sem prófa á hringdælt í gegnum grannt rör og sýni tekin með reglulegu millibili til þess að mæla útfellinguna.

Tilraunirnar voru gerðar á tímabilinu 15. mars til 11. október, 1994.

Tilraunir voru gerðar með mismunandi blöndu jarðsjávar og þéttivatns við hitastigin 60°C, 80°C, 100°C og 120°C. Sýrustig var á bilinu pH 5,6 til 7,8 og selta frá 0 til 2,76%.

Efnagreiningar sýna voru gerðar á staðnum, hjá Kemíu sf og á efnarannsóknastofu Orkustofnunar. Niðurstöður efnagreininganna voru meðhöndlaðar í gagnavinnsluforritinu VDATA (Trausti Hauksson, Kemía sf) en það forrit er sérstaklega skrifað til þess að meðhöndla jarðhitagögn.

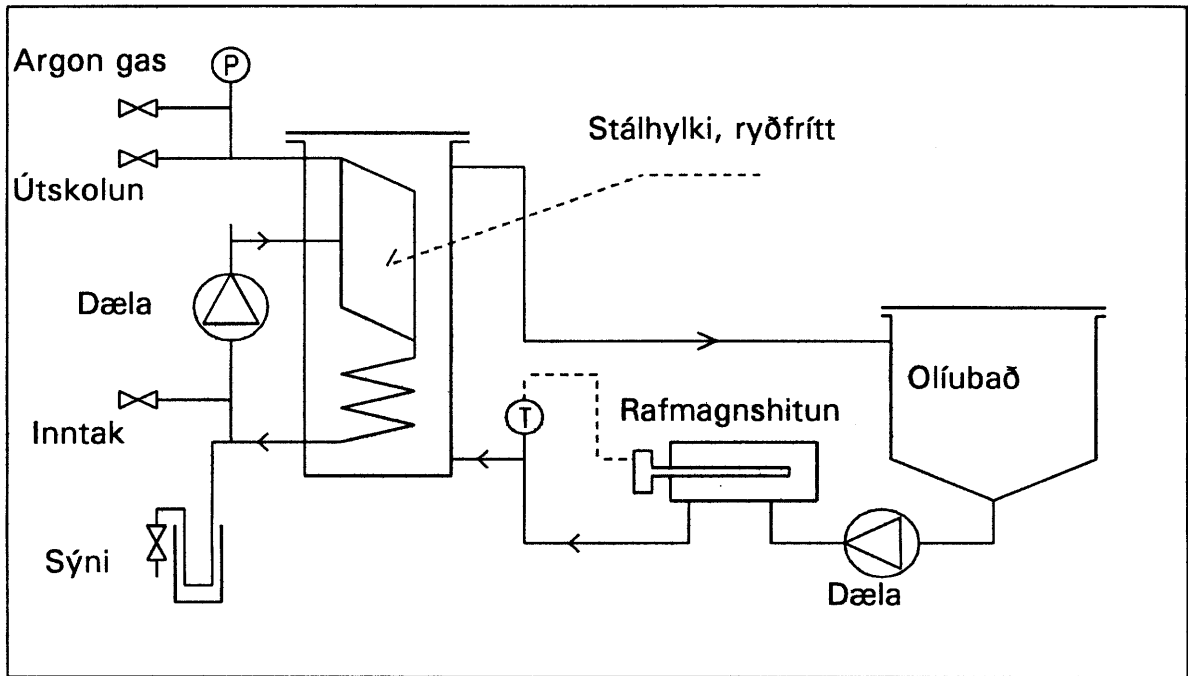
Í þessari skýrslu er framvinda tilraunanna ásamt mæliniðurstöðum úr einstökum tilraunum raktar og helstu niðurstöður rannsóknarinnar tífundaðar ásamt tillögum til úrbóta í rekstri orkuversins í Svartsengi og um framkvæmd niðurdælingar.

## 2 FRAMKVÆMD TILRAUNA

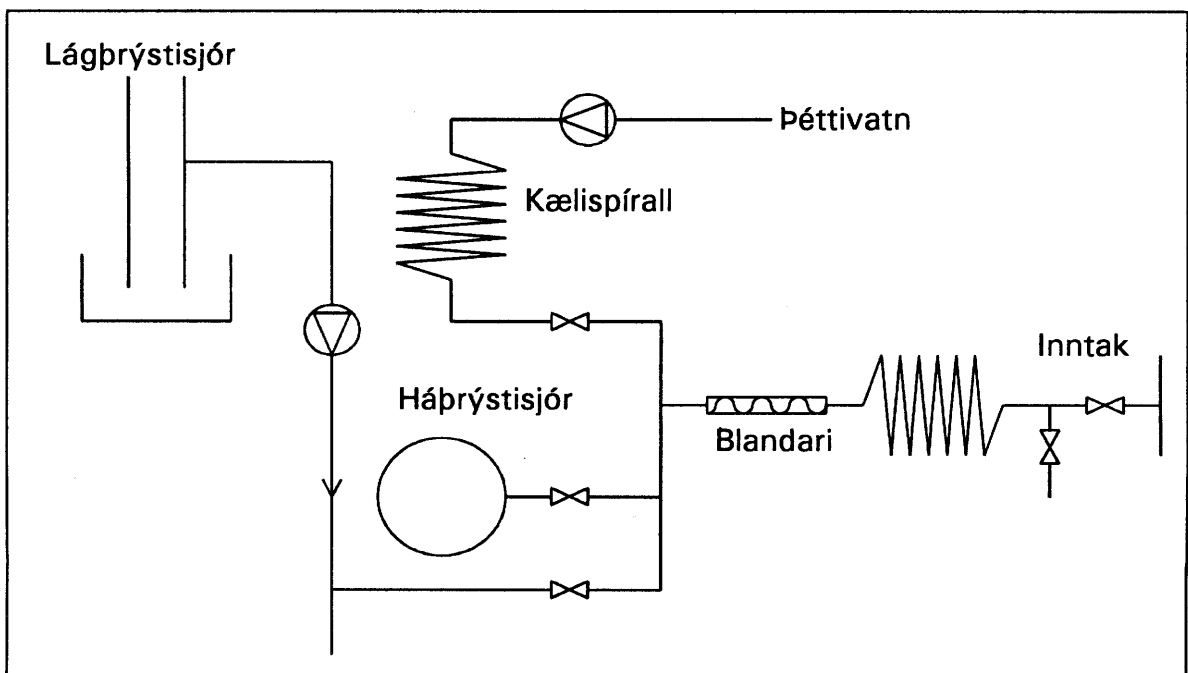
Við tilraunirnar var notaður tilraunabúnaður sem þróaður var til rannsókna á útfellingum magnesíum-silíkats úr hitaveituvatni og var hann fenginn að láni hjá Hitaveitu Reykjavíkur. Honum er lýst í skýrslu um þær tilraunir (Trausti Hauksson og Sverrir Þórhallsson 1993).

Tvö hylki, smíðuð úr ryðfríu stáli, voru notuð. Annað 6,1 lítrar að rúmmáli merkt A og hitt 5,5 lítrar merkt B. Hylkin voru umlukin olíu, sem hituð var með rafmagni. Hitastiginu var stýrt með PID regli með  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  nákvæmni (sjá mynd 2.1).

Tengingum inn á hylkin var breytt þannig að hægt væri að leiða inn á hann jarðsjó og þéttivatn í ýmsum hlutföllum (sjá mynd 2.2).



Mynd 2.1 Stálhylki með hringdælingu, hitað með olíu.



Mynd 2.2 Tengingar inn á stálhylki.



Þrjár lagnir voru lagðar að tækjunum, þ.e. um 80°C heitur lágþrýstisjór úr dæluröri sem liggur í tilraunalón Heilsufélagsins, 155°C heitur háþrýstisjór úr háþrýstilögn frá gufuskiljum og um 100°C heitt þéttivatn úr þéttivatnslögn frá varmaskiptum. Þannig var hægt að fá blöndur með mismunandi kísilinnihaldi og hitastigi.

Fyrst voru stálhylkin skoluð vel með því að láta þéttivatn streyma í gegnum þau í nokkra sólarhringa. Næst voru hylkin fyllt með fullsterkum jarðsjó til þess að hylja yfirborð þeirra með kísilútfellingu.

Fyrir hverja tilraun var blandan látin streyma í gegnum hylkin í um 1 klst. Upphafssýni var tekið úr útrennsli frá hylkjunum og þeim lokað. Argon gasi var hleypt á og þrýstingur stilltur á 3 bör.

Sýni voru síðan tekin með reglulegu millibili í gegnum ryðfrían kælispíral. Um 40 ml af sýni voru látnir renna í 200 ml af eimuðu vatni og lausnin hrist strax til þess að stöðva fjölliðun. Þynningarhlutfall var ákvarðað nákvæmlega með vigtun. 2 x 25 ml af þynntu sýni voru síaðir í gegnum 0,2 µm síu til greiningar á uppleystum kísli og fjölliðuðum kísli. Sían var síðan sett í þriðja glasið til mælingar á föstum svífandi kísli í vatninu. Einnig var tekið sýni til ákvörðunar á sýrustigi. Það var kælt í ryðfríu röri og plastflaska með sýninu sett í vatnsbað og sýrustigið mælt við 25°C. Koldíoxíð (CO<sub>2</sub>), brennisteinsvetni (H<sub>2</sub>S) og heildarstyrkur uppleystra efna (TDS) var mældur í upphafssýni og jafnframt voru tekin nokkur sýni til heildarefnagreiningar. Tímalengd hverrar tilraunar var einn til tveir sólarhringar.

Að lokum var jafnvægisstyrkur kísils mældur í jarðsjónum, bæði í háþrýsti- og lágþrýstisjór. Það var gert þannig að fyrst voru hylkin fyllt með jarðsjó. Eftir um 6 daga við 120°C var tekið sýni og styrkur kísils mældur. Þá var hitastig lækkað í 100°C og næsta sýni tekið eftir 6 daga og svo koll af kolli í 80°C og 60°C.

Tafla 2.1 sýnir yfirlit yfir tilraunir þær sem framkvæmdar voru í Svartsengi.

**Tafla 2.1** Útfellingatilaunir í Svartsengi.

Tilraun nr:	Blanda	Hitastig (°C)	Upphafsstyrkur			Ath
			pH	SiO <sub>2</sub>	TDS	
SA1	79%L+21%P+V	80	7,78	480	21880	Fellihraði
SB1	56%L+V+P	80	7,52	340	15400	"
SA2	100%L	80	7,73	597	27600	"
SB2	75%L+25%P	80	7,62	466	20680	"
SA3	76%H+24%P	100	6,56	418	17510	"
SB3	100%H	100	6,56	586	23150	"
SA4	18%L+82%P	80	6,34	100	5060	Leysnihraði
SB4	100%P	80	6,20	0	2	"
SA5	42%L+58%P	60	6,84	216	11700	Fellihraði
SB5	66%L+34%P	60	7,58	363	18300	"
SA6	41%L+59%P	80	6,65	233	11200	Leysnihraði
SB6	56%L+44%P	80	7,06	322	15400	Fellihraði
SA7	85%H+15%P	120	5,65	458	21300	"
SB7	100%H	120	6,44	538	24700	"
SA8	HP-sjór	60-120	6,81	535	24700	Jafnvægistilr.
SB8	LP-sjór	60-120	7,79	552	28390	"

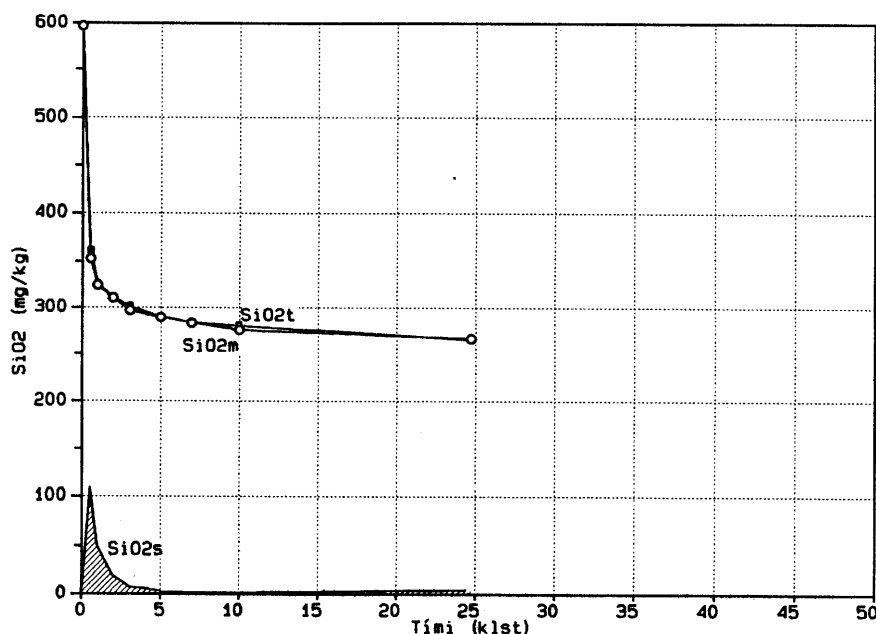
L: lágþrýstisjór, H: háþrýstisjór, P: þéttivatn, V: hitaveituvatn

### 3 NIÐURSTÖÐUR

Niðurstöður tilraunanna eru birtar í heild sinni í viðaukum 1 og 2. Hér á eftir verður stiklað á þeim helstu.

#### 3.1 Útfelling og uppleysing kísils

Stálhylkin voru fyllt með jarðsjó og fylgst með styrkbreytingum kísils á móti tíma í jarðsjónum. Mynd 3.1 sýnir styrkbreytingar í jarðsjó úr lágþrýstiskilju við 80°C.



**Mynd 3.1**  
Útfelling kísils  
úr lágþrýstisjó  
við 80°C

Styrkur kísils í jarðsjónum var um 600 mg/kg við upphaf tilraunarinnar. Fyrsta sýnið var tekið um hálf tíma eftir að hylkinu var lokað. Þá hafði styrkur ófjölíðaðs <sup>1)</sup> kísils lækkað í 350 mg/kg. Um 100 mg/kg af svifefnum (SiO<sub>2s</sub>) mældust í sýninu, sem sýnir að aðeins hluti kísilsins settist á yfirborð hylkisins. Eftir um 5 tíma hafði hægt svo á útfellingunni að allur kísill féll jafnóðum á yfirborð hylkisins og engin svifefni mældust. Í tilraunum þar sem upphafsýfirmettun var minni en í þessari tilraun, mældist ekkert svifefni og allur kísill féll á yfirborð hylkisins.

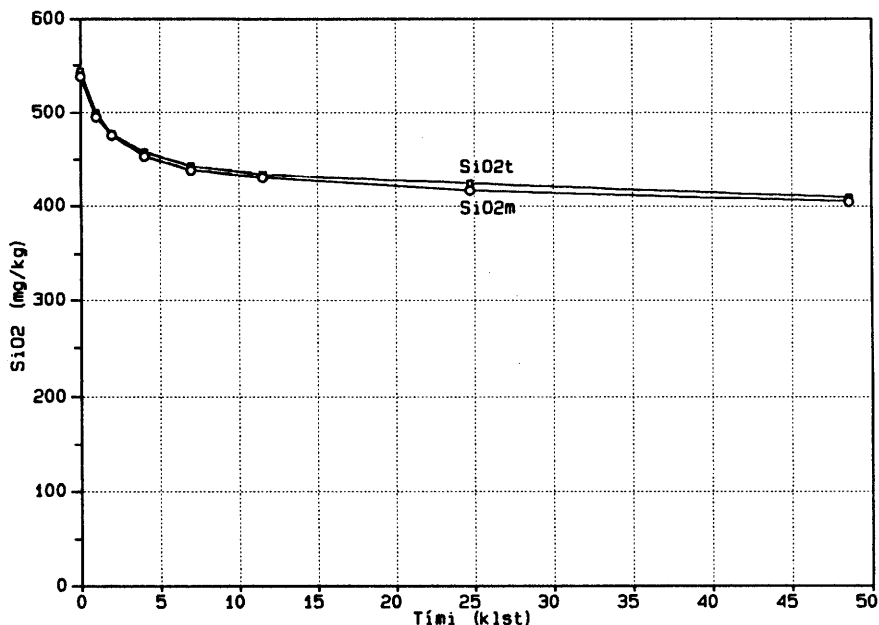
Heildarkísill var samhliða mældur í síuðum sýnum til þess að kanna myndun kísilfjölliða. Yfirleitt mældist ekki marktækur munur á heildarkísli (SiO<sub>2t</sub>) og ófjölíðuðum kísli (SiO<sub>2m</sub>). Undantekning var tilraun við 60°C en þá hafði kísillinn fjölíðast áður en hann streymdi inn í hylkið og hélst styrkur fjölíðaða kísilsins óbreyttur út tilraunina.

Í tilraunum í plastbrúsum myndaðist fjölíðaður kísill í jarðsjónum (Trausti Hauksson 1992). Það virðist því að hringstreymið eða iðan í vatninu komi í veg fyrir myndun fjölíða, þegar útfellingarhraðinn minnkar, t.d. vegna þess að hún auki hraða kísilútfellingar en ekki fjölíðunar.

Eftir 24 tíma var styrkur kísils enn að lækka og átti eftir að lækka enn að jafnvægi. Styrkurinn var þá kominn niður fyrir þann styrk sem talinn var jafnvægisstyrkur við 80°C (281 mg/kg).

1. Með ófjölíðuðum kísli er átt við þann kísil sem mælist í síuðum sjónum með mólybdat litmælingu. Fjölíðaður kísill er mældur með sömu aðferð eftir að hann hefur verið brotinn niður með flúrsýru.

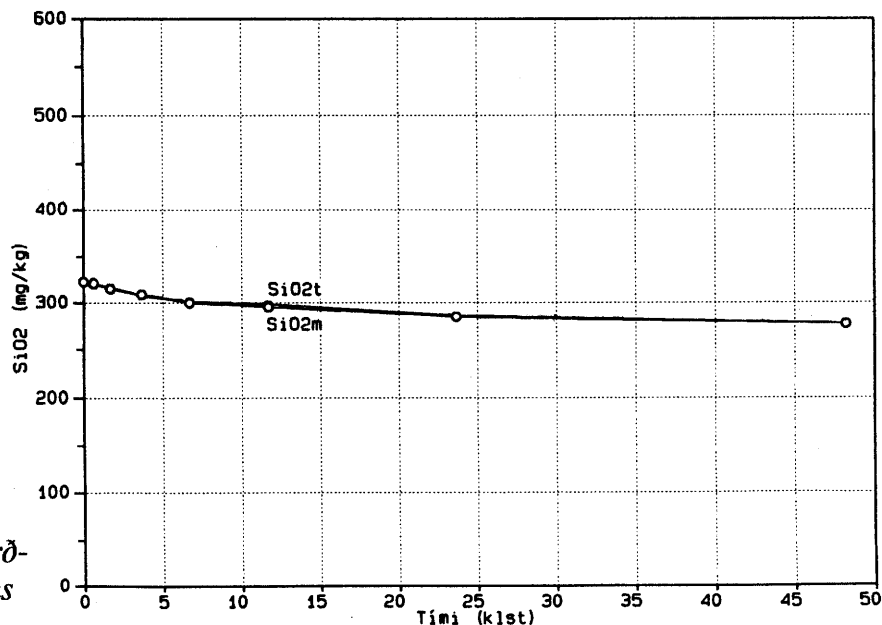
Á mynd 3.2 eru sýndar styrkbreytingar kísils í háþrýstisjó við 120°C.



**Mynd 3.2**  
Útfelling kísils  
úr háþrýstisjó  
við 120°C

Útfellingin gekk hægar fyrir sig við 120°C en í 80°C heitum lágþrýstisjó þrátt fyrir hærra hitastig, vegna þess að yfirmettunin var minni. Eftir 48 tíma var styrkurinn enn að lækka og jafnvægi var ekki náð. Styrkurinn var þá einnig orðinn minni en áður talinn jafnvægisstyrkur við 120°C (458 mg/kg). Lítilsháttar munur mældist á heildarkísli og ófjölliðuðum kísli, þó varla marktækur.

Á mynd 3.3 er sýnd tilraun við 80°C með um 44 % af þéttivatni í jarðsjó frá lágþrýstiskiljum.

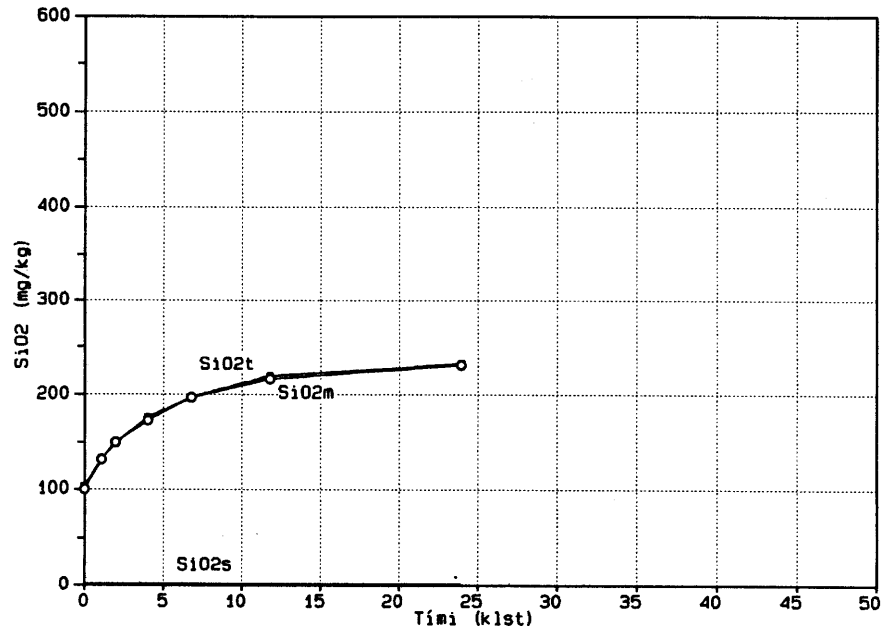


**Mynd 3.3**  
Útfelling kísils  
úr 56% blöndu jarð-  
sjávar og þéttivatns  
við 80°C

Fyrirfram var búist við að enginn kísill myndi falla út vegna þess hve yfirmettunin var lítil, en tilraunir með kyrrstæðan sjó höfðu gefið slíkt til kynna (Trausti Hauksson 1992). Í hylkjum með hringdælingu varð annað uppi á teningnum því kísillinn, sem í upphafi var um 320 mg/kg, byrjaði strax að falla út og var lagtími vart mælanlegur. Útfellingarhraði var að

vísu verulega minni en í tilraun með fullsterkan sjó. Þessi tilraun sýndi að ekki er hægt að stöðva kísilútfellinguna í sterku iðustreymi með því einu að minnka yfirmettun og treysta á að útfellingarefnahvarfið nái sér ekki á strik.

Í nokkrum tilraunum var upphafsstyrkur það lágur að kísilstyrkur hækkaði í sjónum í hylkjunum og stefndi á jafnvægi. Mynd 3.4 sýnir uppleysingu kísils sem áður hafði fallið út í hylkinu.



**Mynd 3.4**  
*Uppleysing kísils við 80°C*

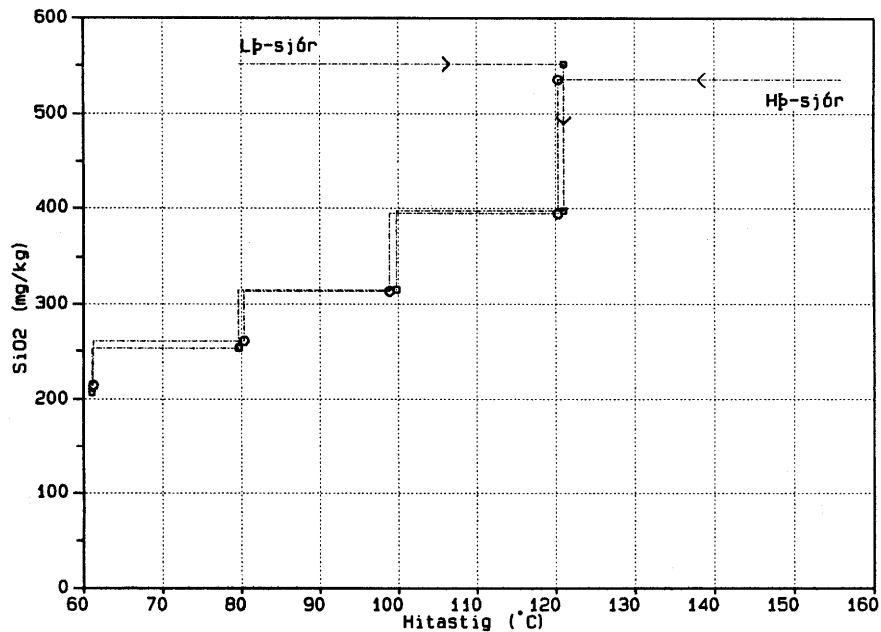
Uppleysingin gerðist nær jafn hratt og fellingin. Athyglisvert er að uppleysnihraði er minni í hreinu þéttivatni en í saltari blöndu. Það er mikilvæg niðurstaða, sérstaklega með tilliti til niðurdælingar, því ef styrkur kísils fer yfir jafnvægi og fellur út í niðurdælingarlögn og holu er hugsanlegt að hægt verði að losa hann aftur með því að dæla í holuna þéttivatns og sjóblöndu sem örugglega er vel undirmettuð. Ef dælt væri hreinu þéttivatni eða afloftuðu ferskvatni mætti samkvæmt tilraunaniðurstöðum búast við verri árangri því leysnihraði væri þá minni.

### 3.2 Jafnvægisstyrkur kísils

Það kom strax í ljós að styrkur kísils lækkaði niður fyrir þann styrk sem talinn var vera jafnvægisstyrkur kísils við tilraunaaðstæður. Það var því ákveðið að ákvarða leysni kísils í jarðsjónum í Svartsengi, þ.e. styrk kísils í sjónum við jafnvægisástand, með sérstakri tilraun.

Þessar tilraunir voru nauðsynlegar til þess að hægt væri að túlka niðurstöður útfellingarhraðatilraunanna. Einnig er gagnlegt við hönnun skilja og niðurdælingarbúnaðar að þekkja vel jafnvægisstyrk kísils, því ef þess er gætt að styrkur kísils í rásinni fari ekki yfir jafnvægisstyrk þá ætti engin kísill að falla út.

Hylkin voru fyllt með jarðsjó. Annað með sjó úr háþrýstiskilju og hitt með sjó úr lágþrýstiskilju. Hiti var stilltur á 120°C og sjórinn látinn hringrása í hylkjunum í 6 sólarhringa. Samkvæmt mælingum á útfellingarhraða átti sá tími að nægja til þess að ná jafnvægi eða því sem næst. Mynd 3.5 sýnir styrkbreytingar kísils í jarðsjónum eftir 6 daga við 120°C og síðan eftir 6 daga við 100°C, 80°C og 60°C.



**Mynd 3.5**  
*Jafnvægistilraunir í Svartsengi*

Kísill féll út og styrkurinn lækkaði í hverju þrepi og var munur á jafnvægisstyrk hvort um var að ræða jarðsjó úr háþrýstiskilju með seltu 2,5% og sýrustig pH 6,8, eða jarðsjó úr lágþrýstiskilju með seltu 2,8% og pH 7,8, innan skekkjumarka.

Þessar tilraunir sýna minni leysni kísils í jarðsjónum en áður var miðað við í Svartsengi. Áður hefur fyrst og fremst verið stuðst við eftirfarandi jöfnu til þess að reikna leysni myndlauss kísils í vatni sem fall af hitastigi (Fournier og Rowe, 1977).

$$\log(cs) = 4,52 - 731/T$$

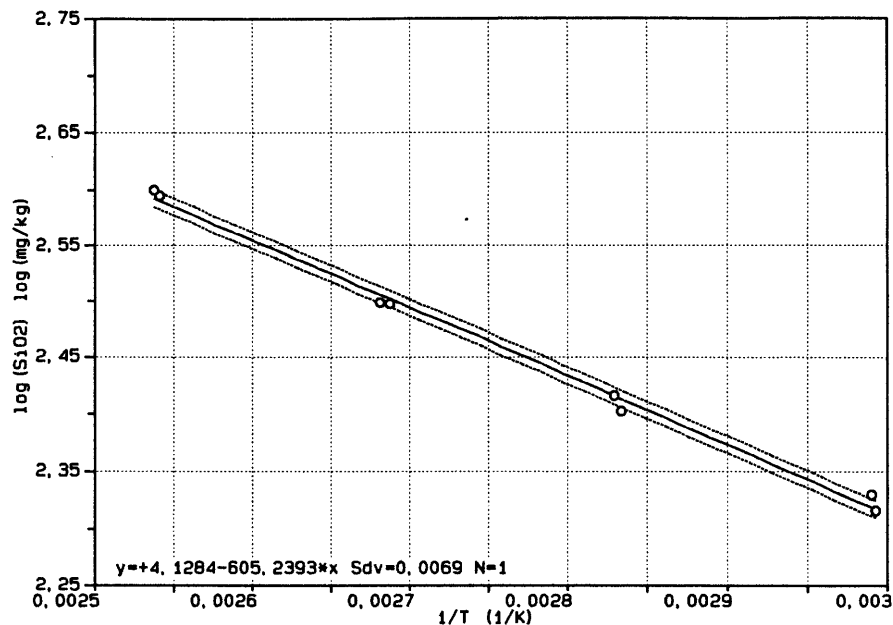
Samkvæmt ofangreindum tilraunaniðurstöðum er réttara að nota eftirfarandi jöfnu til þess að reikna leysni myndlauss kísils í jarðsjónum í Svartsengi, en hún er fengin með því að teikna  $\log(c)$  á móti  $1/T$  og draga bestu línu í gegnum punktana (sjá mynd 3.6).

[1]  $\log(cs) = 4,13 - 605/T$

cs: Jafnvægisstyrkur kísils (mg/kg)

T: Hitastig Kelvin (K)

**Mynd 3.6**  
**Samband**  
*log(cs)* og *1/T*

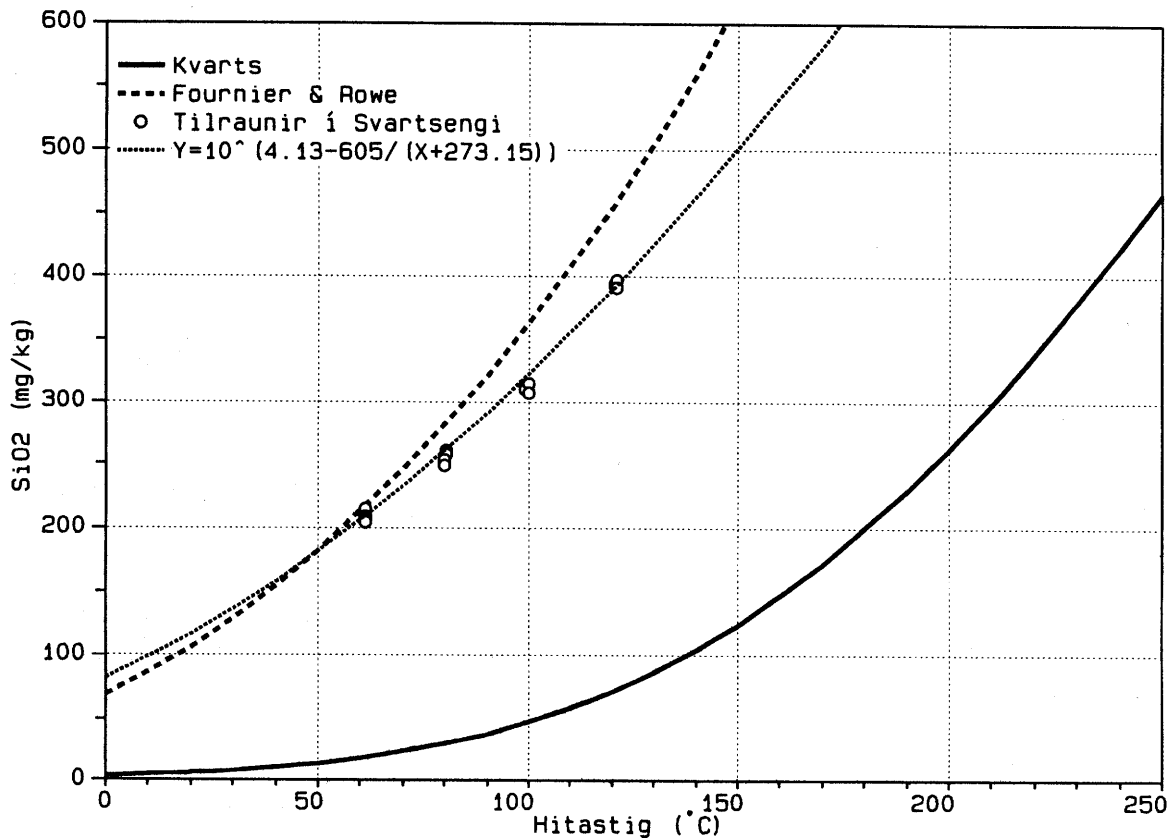


Þar sem þessar niðurstöður víkja verulega frá því sem áður hefur verið talið réttast þá voru sýnin einnig efnagreind á rannsóknastofu Orkustofnunar. Efnagreiningunum bar mjög vel saman eins og sýnt er í töflu 3.1.

**Tafla 3.1** Jafnvægistilraunir í Svartsengi

Númer	Tími (klst)	Hitast. (°C)	SiO <sub>2</sub> m Kemía	SiO <sub>2</sub> m Orkustofnun
<b>Lágþrýstisjör</b>				
SA8-2	149	120,4	394	393
SA8-3	286	99,0	314	310
SA8-4	430	80,3	261	258
SA8-5	599	61,3	214	209
<b>Háþrýstisjör</b>				
SB8-2	149	121,0	398	391
SB8-3	286	99,8	315	308
SB8-4	430	79,7	253	249
SB8-5	599	61,0	207	204

Á mynd 3.7 eru allar mælingarnar settar inn á graf sem sýnir leysni kvars og myndlauss kísils. Dregin er lína samkvæmt jöfnu [1] í gegnum mælipunktana og sést vel hversu mikið niðurstöðurnar víkja frá jöfnu Fournier og Rowe.



Mynd 3.7 Jafnvægisstyrkur kísils sem fall af hitastigi.

Jafna Fournier og Rowe er fengin með tilraunum í ferskvatni og gæti það skýrt aðrar niðurstöður sem fást með saltan jarðsjó í Svartsengi.

Tafla 3.2 sýnir reiknaðan jafnvægisstyrk með jöfnu Fournier og Rowe og jöfnu [1] á hitastigsbilinu 60 til 120 °C.

Tafla 3.2 Jafnvægisstyrkur kísils

Hita- stig (°C)	Tilraunir Svartsengi (mg/kg)	Fournier & Rowe (mg/kg)
60	206	212
70	233	245
80	261	282
90	291	321
100	323	363
110	356	407
120	390	454

### 3.3 Útfellingarhraði kísils

Erfitt hefur reynst að lýsa útfellingarhraða kísils með óyggjandi hætti m.a. vegna þess að tvö efnahvörf eiga sér ætíð stað samtímis þ.e. fjölliðun og útfelling. Með fjölliðun er átt við það þegar kísilsameindir tengjast innbyrðis og mynda stóra kísilfjölliðu sem er uppleyst í vatninu. Samhliða bindast kísilsameindir bæði einliður og stærri sameindir föstu yfirborði stálpípu og agna í vatninu og mynda fasta kísilútfellingu. Gráða útfellingarhvarfsins verður þá 1 ef einliður bindast beint vegg yfirborði 2 ef tvíliður bindast því o.s.frv. Þannig ætti gráða hvarfsins að lækka með auknu iðustreymi, sem eykur líkur á að sameindirnar komist í tæri við fast yfirborð.

Þegar styrkbreytingar á móti tíma í tilraununum eru kannaðar nánar kemur í ljós að best er að lýsa þeim með þriðju gráðu hraðalíkingu.

$$[2] \quad dc/dt = k*(c/cs-1)^3$$

- c: Styrkur kísils (mg/kg).
- cs: Jafnvægisstyrkur kísils (mg/kg).
- k: Hraðafasti (mg/kg/klst).
- t: Tími (klst)

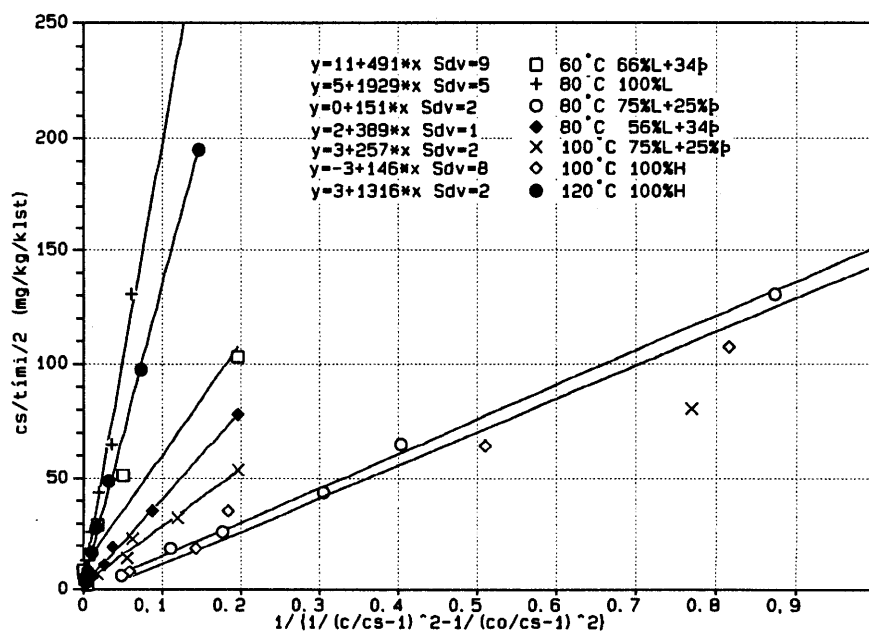
Ef jafna [2] er umrituð og heilduð fæst

$$[3] \quad dt = 1/k/(c/cs-1)^3 dc$$

$$[4] \quad t = -cs/k/2*\{1/(c/cs-1)^2 - 1/(co/cs-1)^2\}$$

$$[5] \quad y = cs/t/2 = -k/\{1/(c/cs-1)^2 - 1/(co/cs-1)^2\} \quad (co: \text{upphafsstyrkur})$$

Jafna [5] gefur beina línur með hallatölunni -k. Á mynd 3.8 eru niðurstöður tilraunanna teiknaðar samkvæmt jöfnu [5] og besta lína dregin í gegnum punktana.



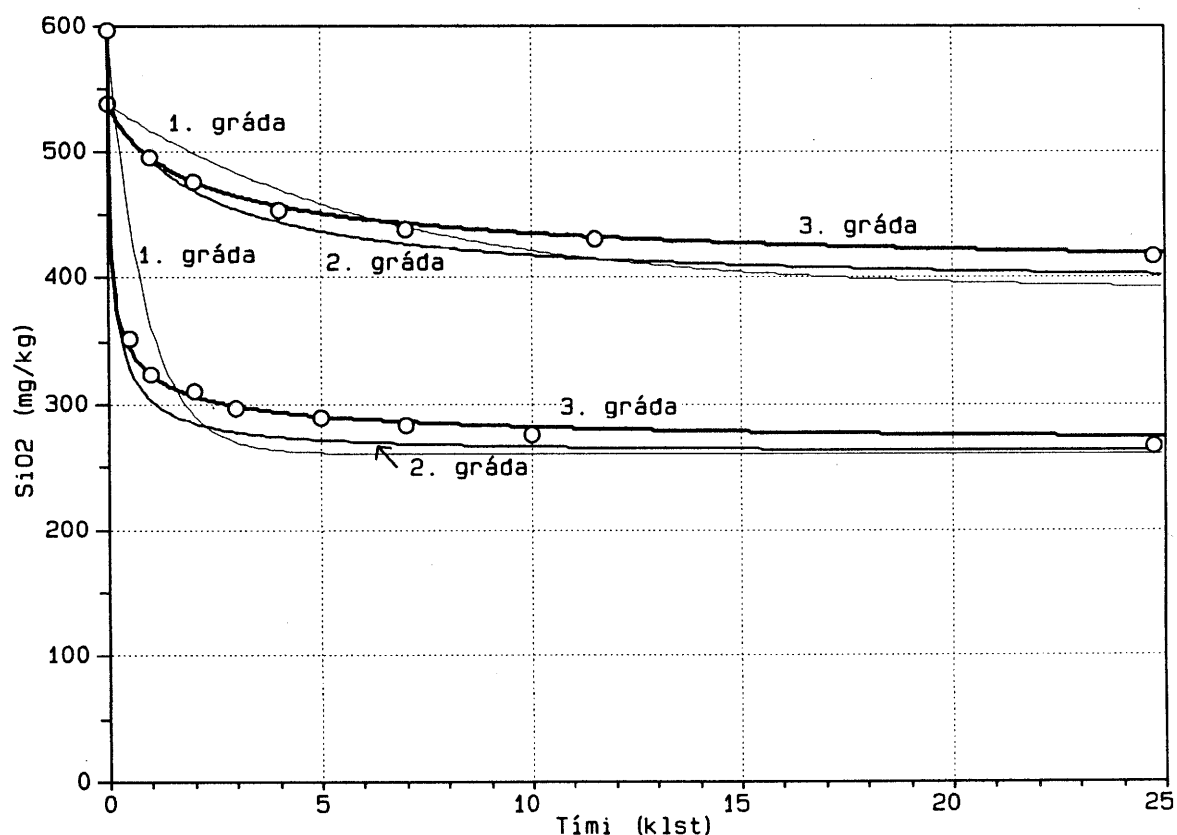
Mynd 3.8  
Hraðafasti  
þriðju gráðu  
líkingar



Nokkuð er breytilegt hvaða gráðu á hraðalíkingu, fyrri tilraunir með kísilútfellingu hafa gefið. Tilraunir í Bjarnarflagi gáfu annarrar gráðu líkingu strax eftir aðskilnað frá gufu við 100°C og fyrstu gráðu líkingu þegar fjölliðun nálgadist jafnvægi (Stefán Arnórsson 1976). Erlendar rannsóknir hafa gefið hraðalíkingar með gráðu frá 1 til 6 oft háð sýrustigi og upphafsyfírmettun. Tilraunir með tilbúna saltar kísillausnir á hitabilinu 50 til 100°C, þar sem fjölliðun og kjörnun kísils var rannsökuð, var best lýst með fimmtu gráðu líkingu en fyrstu gráðu líkingu við mikla yfírmettun (Weres et al. 1980). Hraði útfellinga úr sjó úr borholum í Svartsengi er mismikill og var hægt að skýra það að nokkru með því að nota reiknilíkan þeirra (Jón Örn Bjarnason 1983).

Flestar ofangreindra tilrauna voru gerðar í kyrrstæðu vatni og eru niðurstöður þeirra því ekki alveg sambærilegar við okkar niðurstöður, sem byggja á tilraunum í iðustreymi.

Mynd 3.9 sýnir samanburð á útfellingarferlum reiknuðum samkvæmt fyrstu, annarrar og þriðju gráðu líkingu og niðurstöðu tilrauna við 80°C og 120°C. Besta samræmi fæst með þriðju gráðu líkingu og gildi það um allar tilraunirnar. Munur á þriðju og annarrar gráðu líkingu var ekki mikill en fyrstu gráðu líking var fjarri lagi.



Mynd 3.9 Reiknaður styrkur kísils sem fall af tíma.

Tafla 3.3 sýnir hraðafasta, sem fengust fyrir þriðju gráðu hraðalíkingu, ásamt tilraunaáðstæðum í þeim tilraunum, þar sem útfellingarhraði var mælanlegur.

**Tafla 3.3** Hraðafastar þriðju gráðu líkingar

Blanda (%)	Hitastig (°C)	Selta (%)	pH	Hraðafasti (-k) (mg/kg/klst)
66%L	60	1,83	7,6	491
100%L	80	2,76	7,7	1929
75%L	80	2,07	7,6	151
56%L	80	1,54	7,1	389
100%H	100	2,32	6,6	146
75%H	100	1,75	6,6	257
100%H	120	2,47	6,4	1316

Ekki er reglubundið samband milli hraðafasta annars vegar og hitastigs, sýrustigs og seltu hins vegar. Tilraunirnar gefa þó hugmynd um stærðargráðu útfellingarhraðans og samband yfirmettunar og hraða.

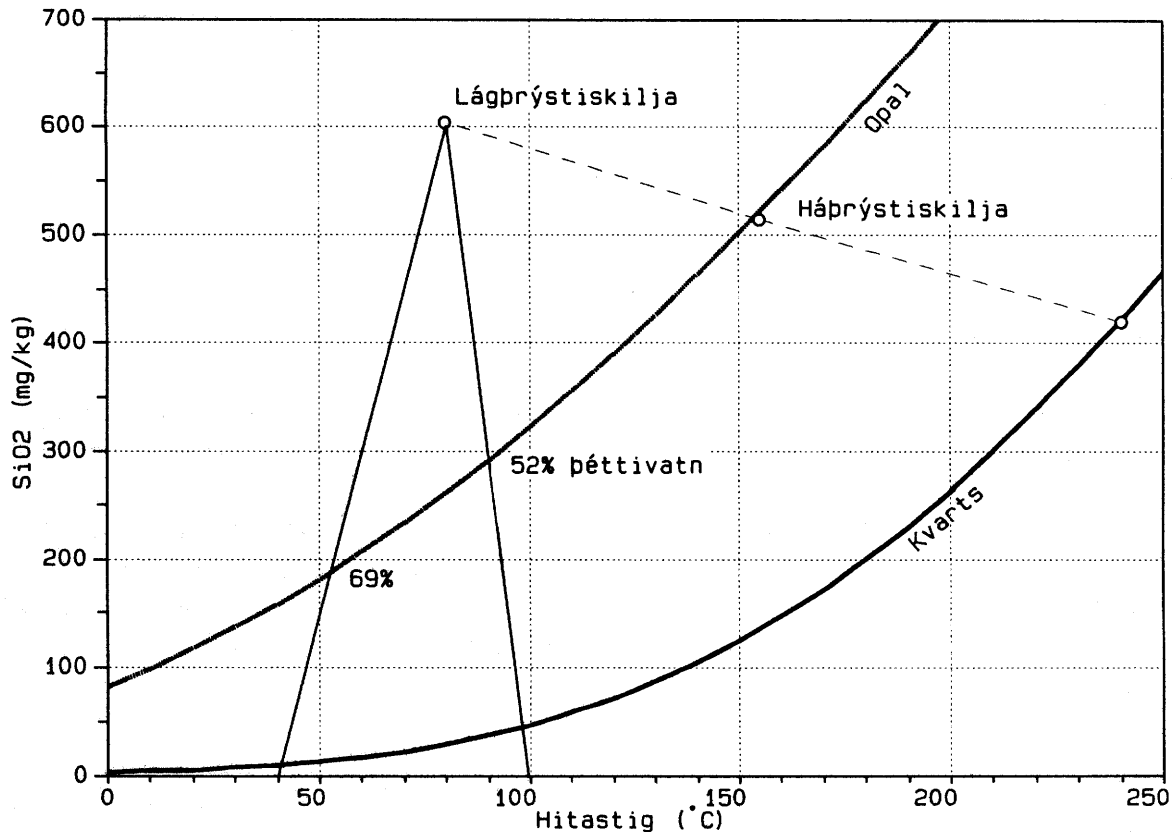
Áhugaverðast er að geta sagt fyrir um útfellingarhraðann þegar yfirmettun er lítil því ekki stendur til að leyfa nema óverulega yfirmettun í niðurdælingarvatni. T.d. er hraðafastinn  $k = -389$  í 56% blöndu jarðsjávar og þéttivatns. Ef sá hraðafasti er notaður fyrir 80°C heitan sjó þá verður útfellingarhraðinn þegar kísilstyrkur er 300 mg/kg.

$$dc/dt = 389 \cdot (300/261 - 1)^3 = 1,3 \text{ (mg/kg/klst)}$$

en t.d. ef kísilstyrkur er 400 mg/kg þá verður hraðinn 61 mg/kg/klst eða nær fimmtugföldun á hraða við 100 mg/kg styrkukningu.

#### 4 TILLÖGUR

Leysni kísils í jarðsjónum er minni en áður var talið. Mynd 4.1 sýnir jafnvægisstyrk kvars og myndlauss kísils (ópals) í jarðsjónum í Svartsengi. Ópalmettun er reiknuð með jöfnu [1].



Mynd 4.1 Kísilmettun í Svartsengissjó.

Jarðsjórinn í Svartsengi streymir um 240°C heitur inn í holurnar og er skilinn frá gufunni við 155°C. Þá hefur kísilstyrkur hækkað úr 420 mg/kg, sem er jafnvægisstyrkur kvars í berggrunninum, í um 515 mg/kg. Í lágþrýstiskilju hækkar kísilstyrkur enn í um 600 mg/kg og sjórinn verður mjög yfirmettaður af kísli og hann fellur hratt út.

Ef jafna [1] er framlengd sést að skiljuvatnið í háþrýstiskilju við 155°C er mjög nálægt mettnarástandi og má skiljuhitastigið ekki lægra vera ef koma á í veg fyrir að kísill falli út í sjólögnum og stjórnlokum háþrýstiskilja.

Ekki er hægt að stöðva kísilútfellingu í iðustreymi með því einu að minnka yfirmettun. Til þess að dæla niður jarðsjó án kísilútfellinga, þarf að lækka styrk kísils niður fyrir mettnarmörk. Til þess þarf 52 % íblöndun þéttivatns hið minnsta og er þá miðað við að blandan sé um 90°C heit og má kísilstyrkur þá ekki fara yfir 290 mg/kg.

Ef varminn í þéttivatninu verður nýttur betur en gert er nú, t.d. niður í 40°C, þá þarf um 69% þéttivatnsíblöndun í jarðsjóinn miðað við 55°C blöndunarhitastig.

Blöndur 40-100°C heits þéttivatns og jarðsjávar frá háþrýstiskiljum eru ætíð undir-mettaðar og því ekki hættu á kísilútfellingu úr slíkum blöndum.

Við niðurdælingu í heitan jarðhitageymi má reikna með að jarðsjórinn hitni á leiðinni niður holuna og því hægt að leyfa sér að einhver útfelling eigi sér stað í lögnum á yfirborði,

ef gert er ráð fyrir að hitstigshækkun muni gera blönduna undirmettaða áður en hún streymir um fínar æðar í berggrunninum.

Miðað við að eðlisþyngd kísilskeljar sé  $1200 \text{ kg/m}^3$  þá samsvarar  $1 \text{ mg/kg/klst}$  útfelling um  $0,3 \text{ mm}$  skeljun á ári ef öll útfellingin sest á pípuyfirborðið og myndar skel ( $8''$  pípa og  $50 \text{ kg/s}$  rennsli). Miðað hefur verið við að leyfa allt að  $1 \text{ mm}$  útfellingu á ári í niðurdælingarlögnum. Samkvæmt hraðafasta 151 og 146 við  $80$  og  $100^\circ\text{C}$  má kísilstyrkur vera allt að  $370 \text{ mg/kg}$  við  $90^\circ\text{C}$ , sem samsvarar um  $38\%$  þéttivatnsblöndun.

### **Framhald rannsókna**

Þrátt fyrir að þessar tilraunir gefi góða mynd af útfellingum kísils í iðustreymi þá vantar nokkuð á að þær séu nægilega yfirgripsmiklar, til þess að hægt sé að byggja á þeim reiknilíkan, sem nota mætti til þess að segja fyrir um útfellingarhraða við allar aðstæður.

Áhugavert væri að gera samsvarandi tilraunir við hærri hita, en til þess þarf að smíða nýjan tilraunabúnað. Einnig er nauðsynlegt að gera tilraunir með meiri breidd í sýrustigi og seltu til þess að hægt sé að reikna með þeim áhrifum á útfellingarhraða. Þær tilraunir væri t.d. hægt að framkvæma á öðrum jarðhitasvæðum þar sem jarðhitavökvinn hefur annað efnainnihald en vökvinn í Svartsengi (t.d. Nesjavöllum og Reykjanesi).

## HEIMILDASKRÁ

- Fournier, R.O., and J.J. Rowe, 1977. *The solubility of amorphous silica in water at high temperatures and high pressures*. American Mineralogist, Vol. 62: 1052-1056.
- Hermann Þórðarson og Þór Tómasson, 1989. *Brine clarification at Svartsengi, Iceland: Effect of pH and temperature on the precipitation of silica and its properties*. Geothermics, Vol 18: 287-294.
- Jón Steinar Guðmundsson, 1978. *Útfellingar og frárennsli orkuversins við Svartsengi*. Athuganir sumarið 1978. Orkustofnun OS-JHD-7850, 40 s.
- Jón Steinar Guðmundsson, 1983. *Silica deposition from geothermal brine at Svartsengi, Iceland*. International Symposium on Solving Corrosion and Scaling Problems in Geothermal Systems, San Francisco, CA, January 17-20, 1983.
- Jón Örn Bjarnason, 1983. *Svartsengi, II. Efnasamsetning jarðsjávar og gufu 1980-1983*. Skýrsla um vinnslu jarðhitans í Svartsengi II hluti. Orkustofnun OS-83086/JHD-17, 18 s.
- Sigurður Rúnar Guðmundsson, 1985. *Athuganir á kísilfjölliðun í jarðsjó í Svartsengi*. Birt sem viðauki í skýrslu: Trausti Hauksson, 1985. *Niðurdælingartilraun í Svartsengi 1984*. Orkustofnun OS-85107/JHD-13.
- Stefán Arnórsson, 1976. *Kísill og brennisteinsvetni í affalsvatni frá gufuborholum*. Orkustofnun, OS JHD 7601, 47 s.
- Trausti Hauksson, 1992: *Svartsengi, Kísiltilraunir á affalsvatni, Íblöndun þéttivatns, sýru og gass*. Orkustofnun OS-92039/JHD-20 B, 30 s.
- Trausti Hauksson og Sverrir Þórhallsson, 1993: *Útfellingar magnesíum-silíkata. Áhrif sýrustigs og hitastigs á útfellingu magnesíum-silíkata úr hitaveituvatni*. Skýrsla um niðurstöður tilrauna í Svartsengi og á Grafarholti. Orkustofnun, OS-93014/JHD-04, 52 s.
- Weres, O., Andrew Y. and Leon T., 1980. *Kinetics of silica polymerization*. Earth Science Division, Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-7033 UC-4, 256 s.

# **VIÐAUKAR**

## TÖFLUSKRÁ VIÐAUKA

<b>Tafla</b>		<b>bls</b>
V1.1	Tilraun SA1, 80°C, 79% lágprýstisjór +21% afloftað vatn	26
V1.2	Tilraun SB1, 80°C, 56% lágprýstis +15% afl. vatn+29% þv	26
V1.3	Tilraun SA2, 80°C, 100% lágprýstisjór	28
V1.4	Tilraun SB2, 80°C, 75% lágprýstisjór + 25% þéttivatn	28
V1.5	Tilraun SA3, 100°C, 75% háprýstisjór + 25% þéttivatn	30
V1.6	Tilraun SB3, 100°C, 100% háprýstisjór	30
V1.7	Tilraun SA4, 80°C, 20% lágprýstisjór + 80% þéttivatn	32
V1.8	Tilraun SB4, 80°C, 100% þéttivatn	32
V1.9	Tilraun SA5, 60°C, 42% lágprýstisjór + 58% þéttivatn	34
V1.10	Tilraun SB5, 60°C, 66% lágprýstisjór + 34% þéttivatn	34
V1.11	Tilraun SA6, 80°C, 41% lágprýstisjór + 59% þéttivatn	36
V1.12	Tilraun SB6, 80°C, 56% lágprýstisjór + 44% þéttivatn	36
V1.13	Tilraun SA7, 120°C, 85% háprýstisjór + 15% þéttivatn	38
V1.14	Tilraun SB7, 120°C, 100% háprýstisjór	38
V2.1	Tilraun SA8, 100% háprýstisjór, 4x6 dagar	44
V2.2	Tilraun SB8, 100% lágprýstisjór, 4x6 dagar	44

## MYNDASKRÁ VIÐAUKA

<b>Mynd</b>		<b>bls</b>
V1.1	Tilraun SA1, 80°C, 79% lágprýstisjór +21% afloftað vatn	27
V1.2	Tilraun SB1, 80°C, 56% lágprýstis +15% afl. vatn+29% þv	27
V1.3	Tilraun SA2, 80°C, 100% lágprýstisjór	29
V1.4	Tilraun SB2, 80°C, 75% lágprýstisjór + 25% þéttivatn	29
V1.5	Tilraun SA3, 100°C, 75% háprýstisjór + 25% þéttivatn	31
V1.6	Tilraun SB3, 100°C, 100% háprýstisjór	31
V1.7	Tilraun SA4, 80°C, 20% lágprýstisjór + 80% þéttivatn	33
V1.8	Tilraun SB4, 80°C, 100% þéttivatn	33
V1.9	Tilraun SA5, 60°C, 42% lágprýstisjór + 58% þéttivatn	35
V1.10	Tilraun SB5, 60°C, 66% lágprýstisjór + 34% þéttivatn	35
V1.11	Tilraun SA6, 80°C, 41% lágprýstisjór + 59% þéttivatn	37
V1.12	Tilraun SB6, 80°C, 56% lágprýstisjór + 44% þéttivatn	37
V1.13	Tilraun SA7, 120°C, 85% háprýstisjór + 15% þéttivatn	39
V1.14	Tilraun SB7, 120°C, 100% háprýstisjór	39

# **VIÐAUKI 1**

**NIÐURSTÖÐUR TILRAUNA  
FELLIHRAÐI KÍSILS**





## V1 Fellihraði kísils

Stálhylki voru fyllt með blöndu jarðsjávar og þéttivatns og látin hringrása í 24 til 48 tíma. Sýni voru tekin með jöfnu millibili og kísilstyrkur og sýrustig (pH) mælt. Í upphafi tilrauna voru tekin sýni til mælinga á seltu (TDS) og kolsýru (CO<sub>2</sub>) og einnig til efnagreininga helstu steinefna í jarðsjónum. Hér á eftir eru allar mælingar teknar saman í töflum og myndum.

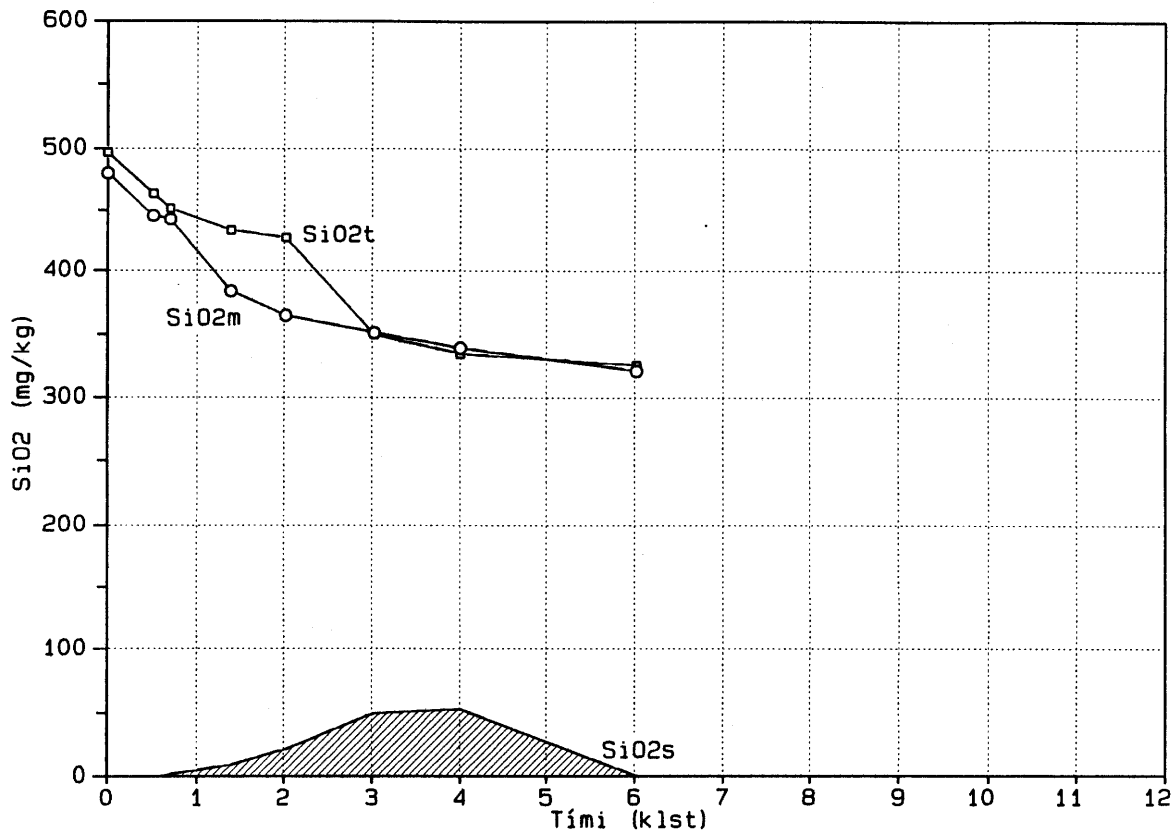
SiO<sub>2m</sub> ófjölliðaður kísill  
SiO<sub>2t</sub> heildarkísill  
SiO<sub>2s</sub> kísill mældur á síu

**Tafla V1.1** Kísiltillraunir í Svartsengi  
Tilraun SA1, 80°C, 79% lágþrýstisjór +21% afloftað vatn

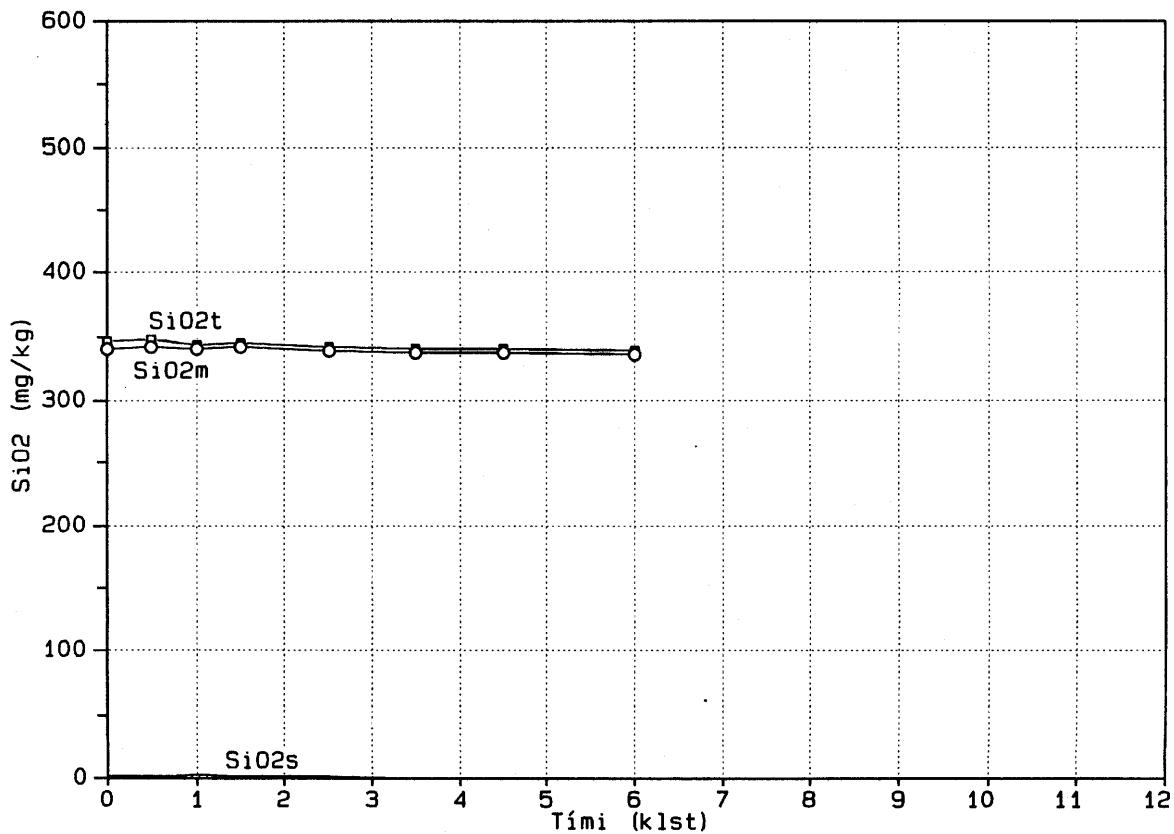
Númer	Tími (klst)	Hitast. (°C)	pH/25	-----Efnastyrkur (mg/kg)-----												
				Basi (OH)	CO2	H2S	SiO2m	SiO2t	SiO2s	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	TDS
SA1-1	0,00	80,0	7,78	14,2	26,2	0,10	480	497	0	6400	963	990	2,06			21880
SA1-2	0,52	80,0	7,82				446	464	0							
SA1-3	0,72	80,0	7,82				443	451	2							
SA1-4	1,38	80,0	7,77				384	434	10							
SA1-5	2,02	80,0	7,68				364	427	21							
SA1-6	3,02	80,0	7,71				351	350	50							
SA1-7	4,02	80,0	7,75				339	334	53							
SA1-8	6,02	80,0	7,88				321	325	0							

**Tafla V1.2** Kísiltillraunir í Svartsengi  
Tilraun SB1, 80°C, 56% lágþrýstisjór +15% afloftað vatn+29% péttivatn

Númer	Tími (klst)	Hitast. (°C)	pH/25	-----Efnastyrkur (mg/kg)-----												
				Basi (OH)	CO2	H2S	SiO2m	SiO2t	SiO2s	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	TDS
SB1-1	0,00	80,0	7,52	12,1	32,4	0,20	340	346	1							15400
SB1-2	0,50	80,0	7,54				342	348	1							
SB1-3	1,00	80,0	7,46				341	343	3							
SB1-4	1,50	80,0	7,56				342	345	1							
SB1-5	2,50	80,0	7,63				339	342	1							
SB1-6	3,50	80,0	7,59				337	340	0							
SB1-7	4,50	80,0	7,58				337	341	0							
SB1-8	6,00	80,0	7,58				336	339	0							



*Mynd VI.1 Tilraun SA1, 80°C, 79% lágbrýstisjór +21% afloftað vatn*



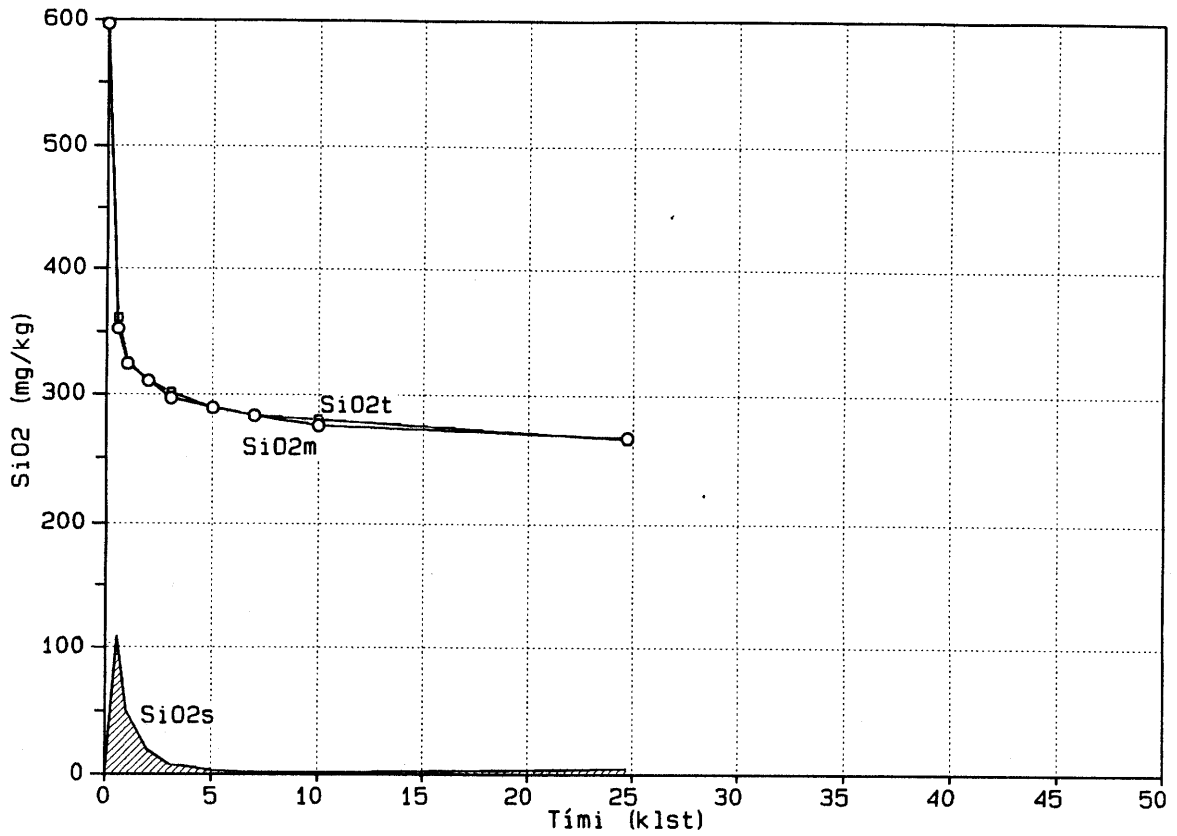
*Mynd VI.2 Tilraun SB1, 80°C, 56% lágbrýstisjór +15% afloftað vatn +29% þéttvatn*

**Tafla V1.3** Kísiltílaunir í Svartsengi  
Tílaun SA2, 80°C, 100% lágþrýstisjór

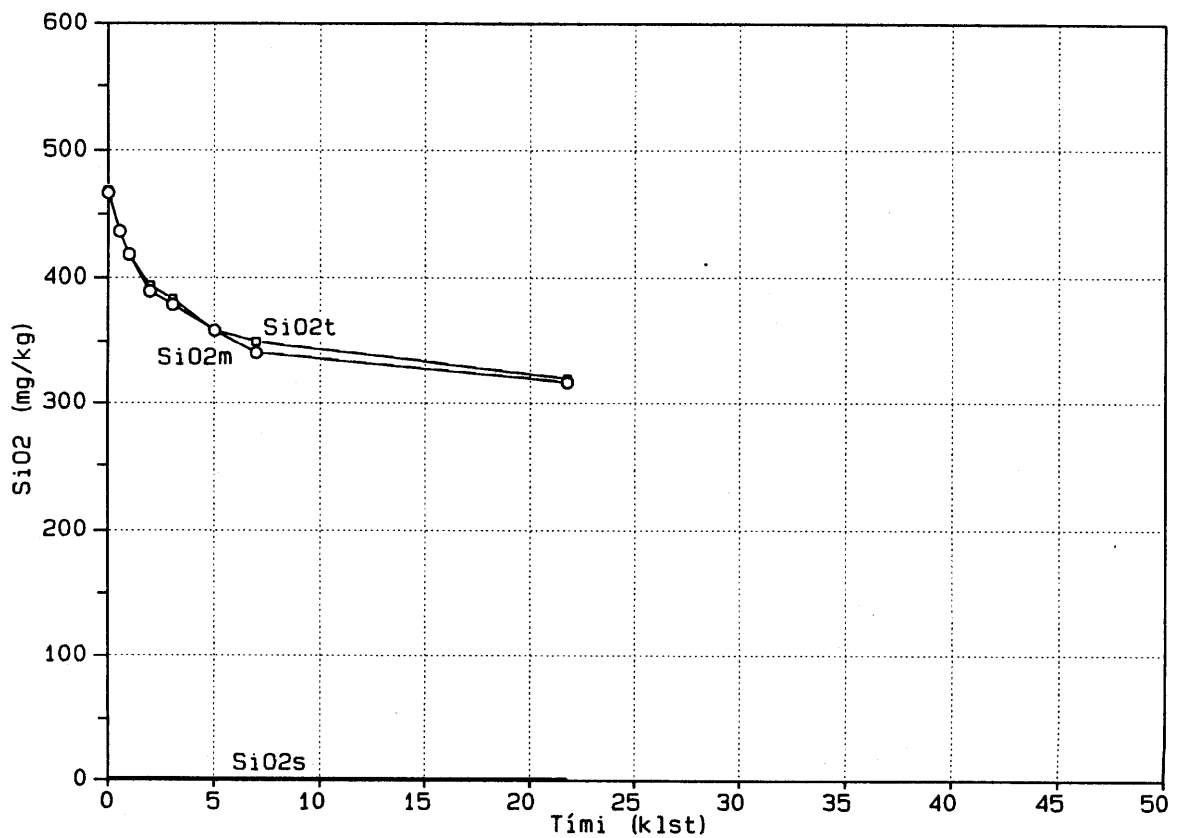
Númer	Tími (klst)	Hitast. (°C)	pH/25	-----Efnastyrkur (mg/kg)-----				Kísill-----				SO4	TDS			
				Basi (OH)	CO2	H2S	SiO2m	SiO2t	SiO2s	Na	K			Ca	Mg	Cl
SA2-1	0,00	80,0	7,73	16,7	29,9	0,00	597	608	1	8380	1260	1300	0,71	16700	42,4	27600
SA2-2	0,50	80,0	7,90				353	361	109							
SA2-3	1,00	80,0	7,89				324	326	49							
SA2-4	2,00	80,0	7,85				310	311	20							
SA2-5	3,00	80,0	7,88				297	302	8							
SA2-6	5,00	80,0	7,86				289	290	3							
SA2-7	7,00	80,0	7,86				283	284	2							
SA2-8	10,00	80,0	7,85				276	281	2							
SA2-9	24,75	80,0	7,83				267	265	4	8280	1250	1280	0,80			

**Tafla V1.4** Kísiltílaunir í Svartsengi  
Tílaun SB2, 80°C, 75% lágþrýstisjór + 25% péttivatn

Númer	Tími (klst)	Hitast. (°C)	pH/25	-----Efnastyrkur (mg/kg)-----				Kísill-----				SO4	TDS			
				Basi (OH)	CO2	H2S	SiO2m	SiO2t	SiO2s	Na	K			Ca	Mg	Cl
SB2-1	0,00	80,0	7,62	10,0	25,4	0,20	466	468	1							20680
SB2-2	0,50	80,0	7,65				437	437	1							
SB2-3	1,00	80,0	7,65				418	419	2							
SB2-4	2,00	80,0	7,65				390	394	1							
SB2-5	3,00	80,0	7,65				379	384	1							
SB2-6	5,00	80,0	7,67				358	358	1							
SB2-7	7,00	80,0	7,68				341	350	1							
SB2-8	21,75	80,0	7,69				316	319	1							

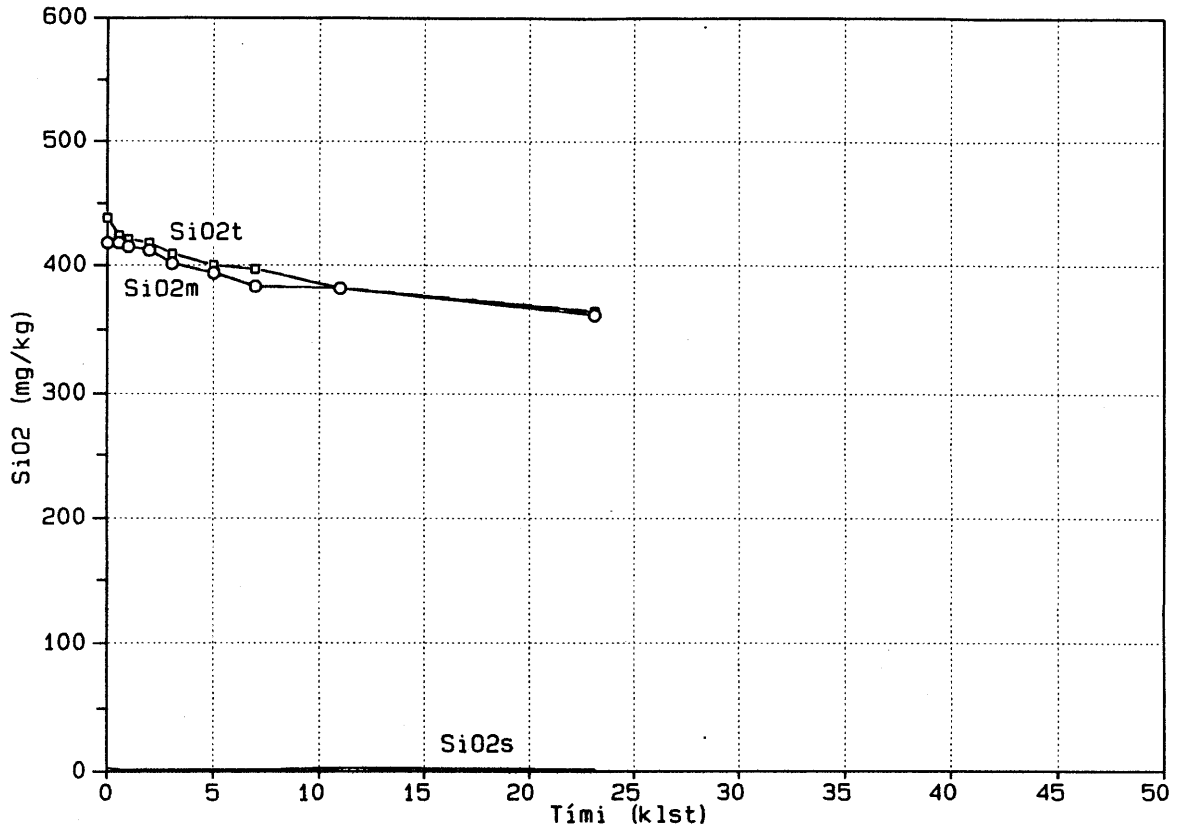


Mynd VI.3 Tilraun SA2, 80°C, 100% lágþrýstisjór

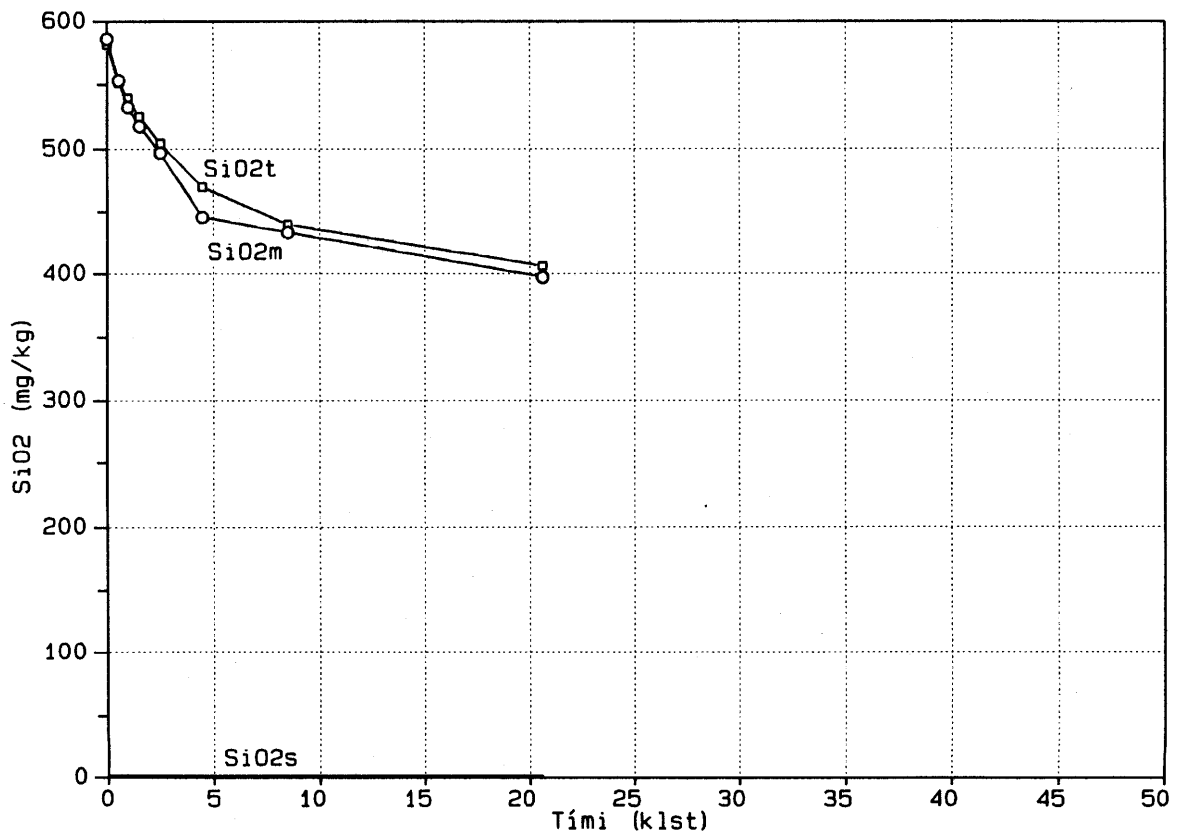


Mynd VI.4 Tilraun SB2, 80°C, 75% lágþrýstisjór + 25% þéttivatn





Mynd V1.5 Tilraun SA3, 100°C, 75% háþrýstisjór + 25% þéttivatn



Mynd V1.6 Tilraun SB3, 100°C, 100% háþrýstisjór

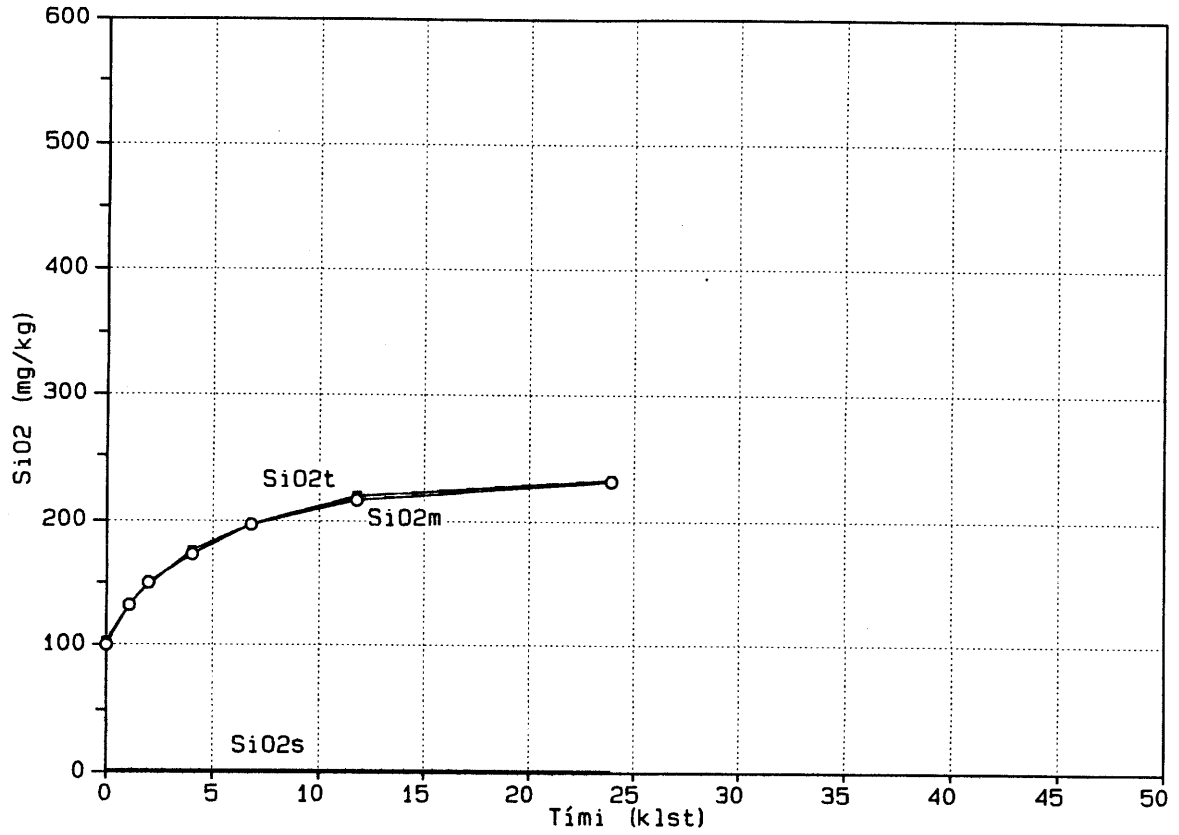


**Tafla V1.7** Kísilttilraunir í Svartsengi  
Tilraun SA4, 80°C, 20% lágþrýstisjór + 80% þéttivatn

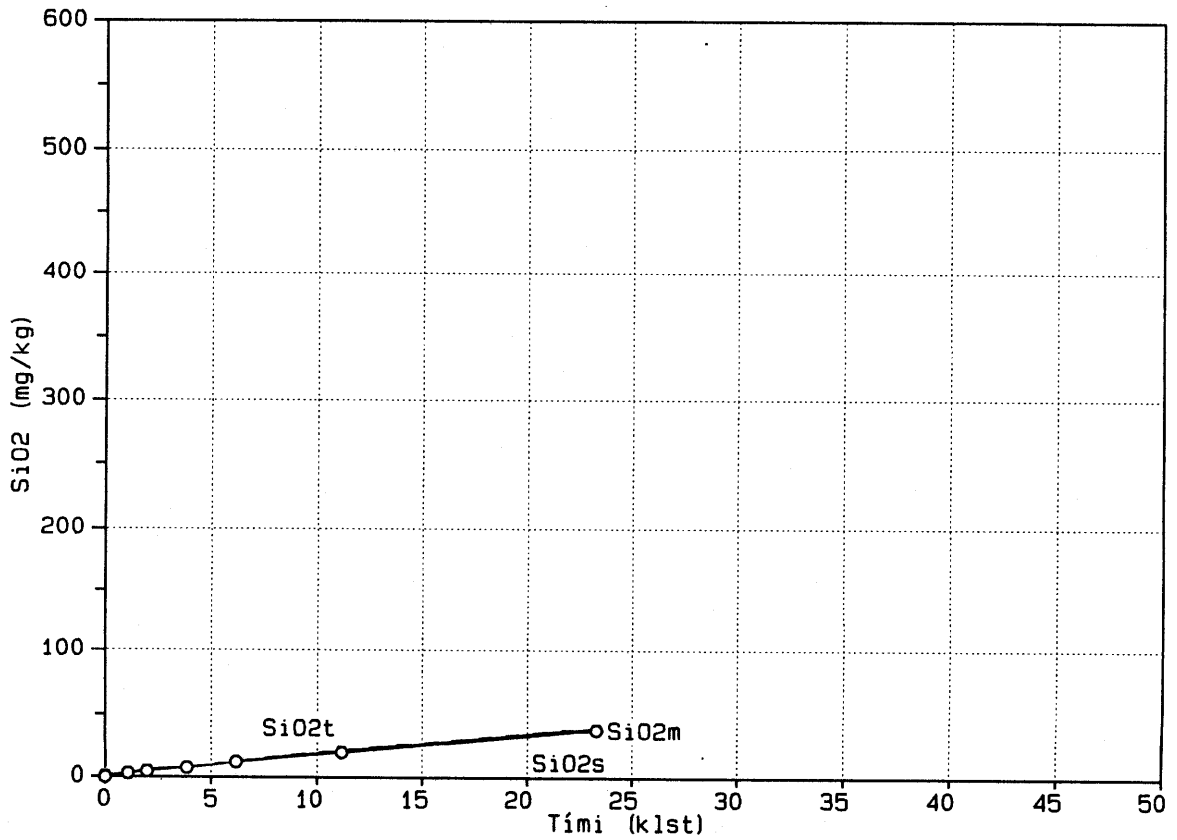
Númer	Tími (klst)	Hitast. (°C)	pH/25	-----Efnastyrkur (mg/kg)-----							TDS
				Basi (OH)	CO2	H2S	SiO2m	SiO2t	SiO2s	Na	
SA4-1	0,00	80,0	6,34	4,2	20,3	0,15	100	103	1	1500	5060
SA4-2	1,05	80,0	6,35				132	132	1		
SA4-3	2,00	80,0	6,35				150	149	2		
SA4-4	4,00	80,0	6,46				173	175	1		
SA4-5	6,75	80,0	6,57				196	197	1		
SA4-6	11,75	80,0	6,69				216	219	1		
SA4-7	23,92	80,0	6,62				231	232	1		

**Tafla V1.8** Kísilttilraunir í Svartsengi  
Tilraun SB4, 80°C, 100% þéttivatn

Númer	Tími (klst)	Hitast. (°C)	pH/25	-----Efnastyrkur (mg/kg)-----							TDS
				Basi (OH)	CO2	H2S	SiO2m	SiO2t	SiO2s	Na	
SB4-1	0,00	80,0	6,20	2,8	18,0	0,20	0	1	0	2	2
SB4-2	1,03	80,0	6,24				3	2	0		
SB4-3	2,00	80,0	6,30				5	6	0		
SB4-4	3,83	80,0	6,40				8	8	0		
SB4-5	6,17	80,0	6,45				12	12	0		
SB4-6	11,17	80,0	6,51				20	21	0		
SB4-7	23,33	80,0	6,67				37	39	0		



Mynd VI.7 Tilraun SA4, 80°C, 20% lágþrýstisjór + 80% þéttivatn



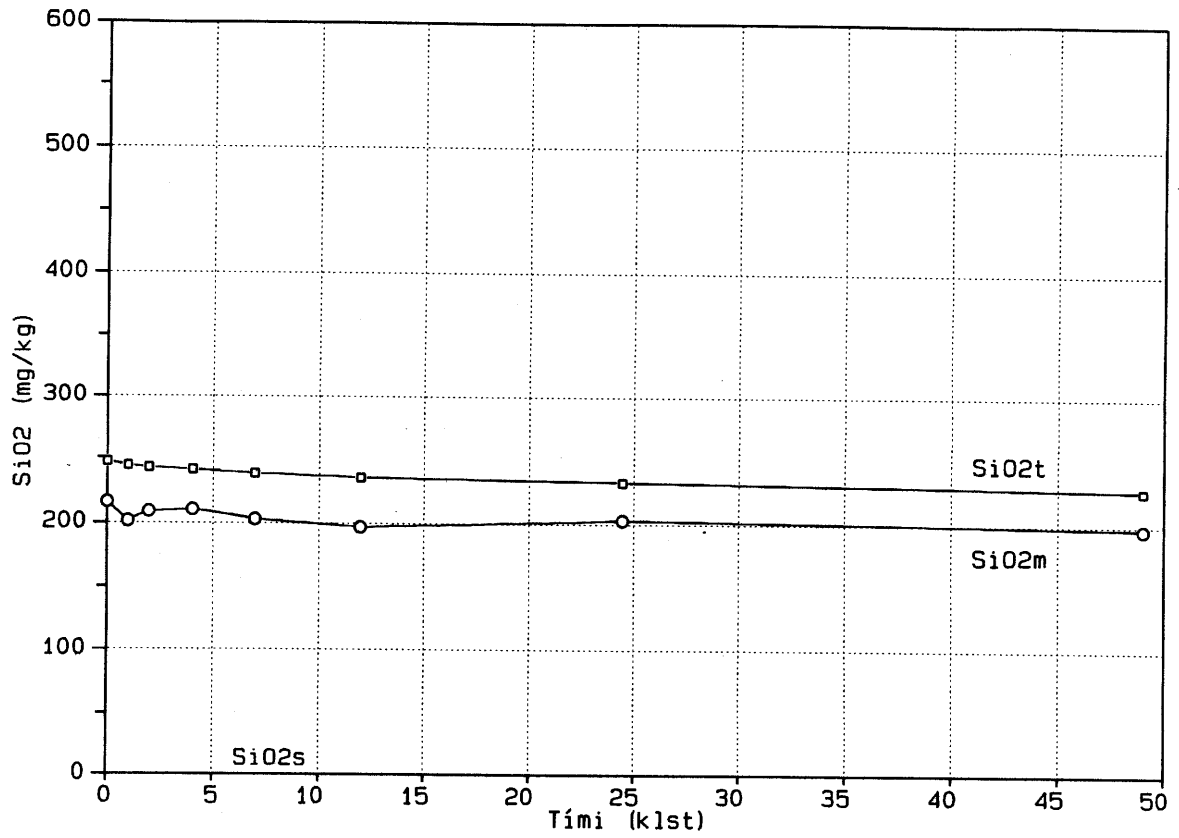
Mynd VI.8 Tilraun SB4, 80°C, 100% þéttivatn

**Tafla V1.9** Kísilttilraunir í Svartsengi  
Tilraun SA5, 60°C, 42% lágbrýstisjór + 58% péttivatn

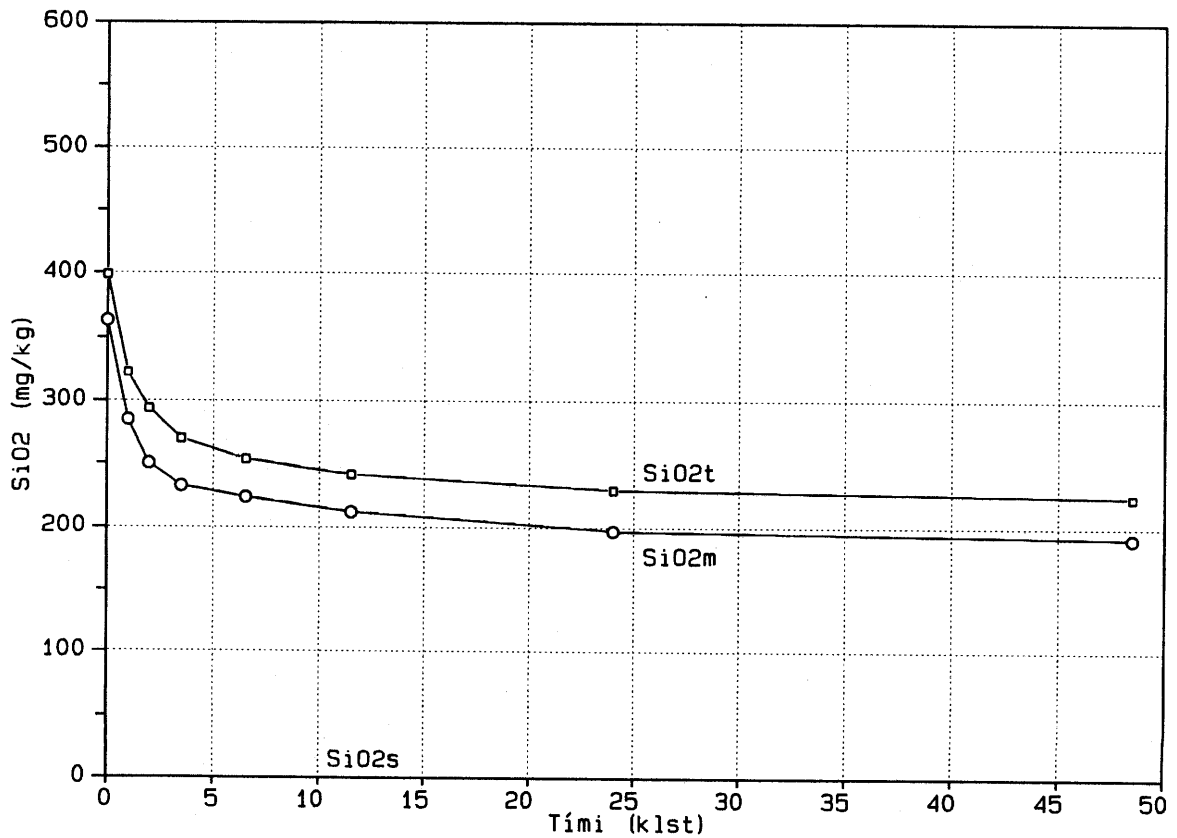
Númer	Tími (klst)	Hitast. (°C)	pH/25	----Efnastyrkur (mg/kg)-----				Kísill-----				SO4	TDS	
				Basi (OH)	CO2	H2S	SiO2m	SiO2t	SiO2s	Na	K			Ca
SA5-1	0,00	60,0	6,84	8,6	27,0	0,10	216	248	0	3420	521	544	0,31	11700
SA5-2	1,00	60,0	6,86				201	245	0					
SA5-3	2,00	60,0	6,89				208	243	0					
SA5-4	4,00	60,0	6,92				210	241	0					
SA5-5	7,00	60,0	7,00				202	238	0					
SA5-6	12,00	60,0	7,03				197	235	0					
SA5-7	24,50	60,0	7,12				203	233	0	3480	522	542	0,45	
SA5-8	49,00	60,0	7,12				197	227	0					

**Tafla V1.10** Kísilttilraunir í Svartsengi  
Tilraun SB5, 60°C, 66% lágbrýstisjór + 34% péttivatn

Númer	Tími (klst)	Hitast. (°C)	pH/25	----Efnastyrkur (mg/kg)-----				Kísill-----				SO4	TDS	
				Basi (OH)	CO2	H2S	SiO2m	SiO2t	SiO2s	Na	K			Ca
SB5-1	0,00	60,0	7,58	12,4	27,9	0,15	363	399	0	5560	840	870	0,49	18300
SB5-2	1,00	60,0	7,63				285	323	0					
SB5-3	2,00	60,0	7,65				250	294	0					
SB5-4	3,50	60,0	7,67				233	270	0					
SB5-5	6,50	60,0	7,67				224	253	0					
SB5-6	11,50	60,0	7,71				211	242	0					
SB5-7	24,00	60,0	7,72				197	230	0	5570	841	870	0,52	
SB5-8	48,50	60,0	7,73				190	224	0					



*Mynd VI.9 Tilraun SA5, 60°C, 42% lágþrýstisjór + 58% þéttivatn*



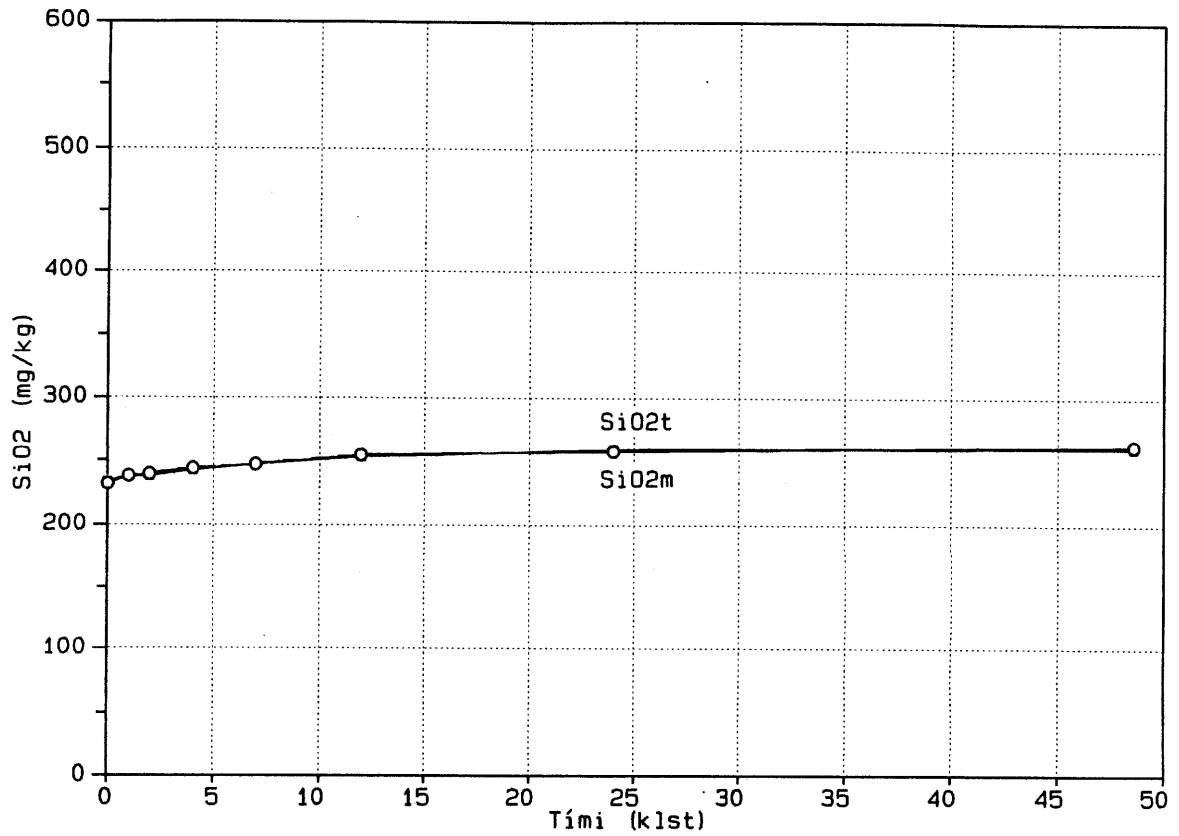
*Mynd VI.10 Tilraun SB5, 60°C, 66% lágþrýstisjór + 34% þéttivatn*

**Tafla V1.11** Kísilttilraunir í Svartsengi  
Tilraun SA6, 80°C, 41% lágþrýstisjór + 59% þéttivatn

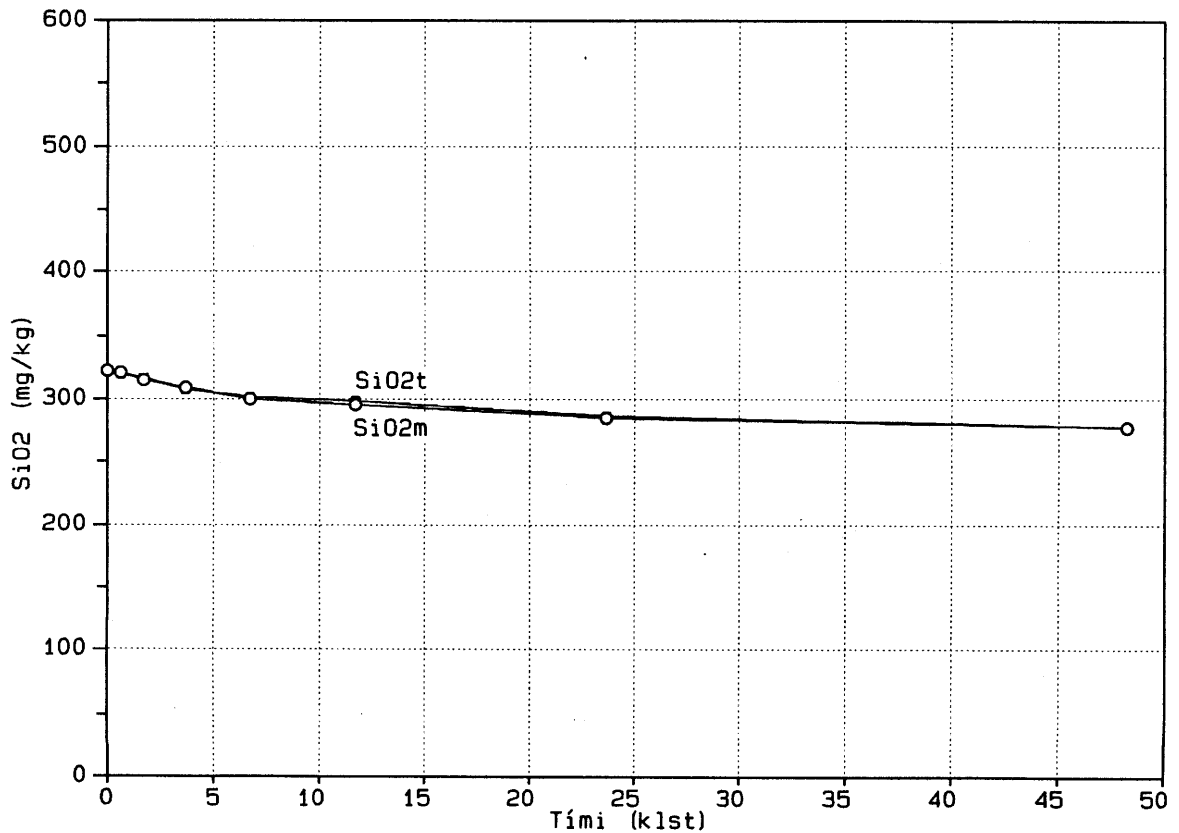
Númer	Tími (klst)	Hitast. (°C)	pH/25	Basi		Kísill		Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	TDS
				(OH)	CO2	H2S	SiO2m							
SA6-1	0,00	80,0	6,65	7,7	26,9	0,05	233	234	3350	501	529	0,41		11200
SA6-2	1,00	80,0	6,64				238	238						
SA6-3	2,00	80,0	6,68				240	239						
SA6-4	4,00	80,0	6,76				245	243						
SA6-5	7,00	80,0	6,84				248	247						
SA6-6	12,00	80,0	6,96				255	253						
SA6-7	24,00	80,0	7,01				258	259						
SA6-8	48,58	80,0	7,07				263	261	3400	510	530	0,59		

**Tafla V1.12** Kísilttilraunir í Svartsengi  
Tilraun SB6, 80°C, 56% lágþrýstisjór + 44% þéttivatn

Númer	Tími (klst)	Hitast. (°C)	pH/25	Basi		Kísill		Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	TDS
				(OH)	CO2	H2S	SiO2m							
SB6-1	0,00	80,0	7,06	10,5	29,5	0,05	322	322	4590	690	730	0,43		15400
SB6-2	0,67	80,0	7,06				321	320						
SB6-3	1,67	80,0	7,09				315	316						
SB6-4	3,67	80,0	7,15				309	307						
SB6-5	6,67	80,0	7,22				300	301						
SB6-6	11,67	80,0	7,29				296	298						
SB6-7	23,67	80,0	7,33				285	286						
SB6-8	48,25	80,0	7,36				277	277	4580	690	720	0,52		



Mynd VI.11 Tilraun SA6, 80°C, 41% lágþrýstisjór + 59% þéttivatn



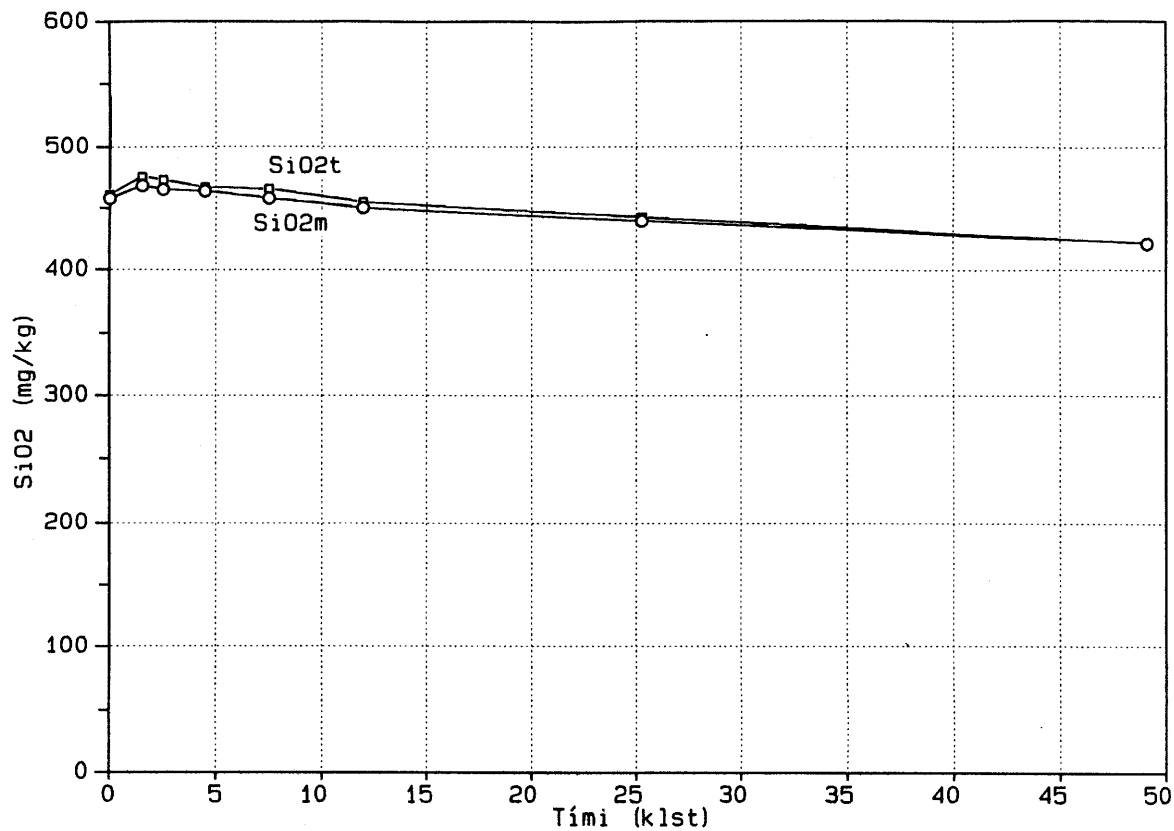
Mynd VI.12 Tilraun SB6, 80°C, 56% lágþrýstisjór + 44% þéttivatn

**Tafla V1.13** Kísiltílaunir í Svartsengi  
Tílaun SA7, 120°C, 85% háþrýstisjór + 15% þéttivatn

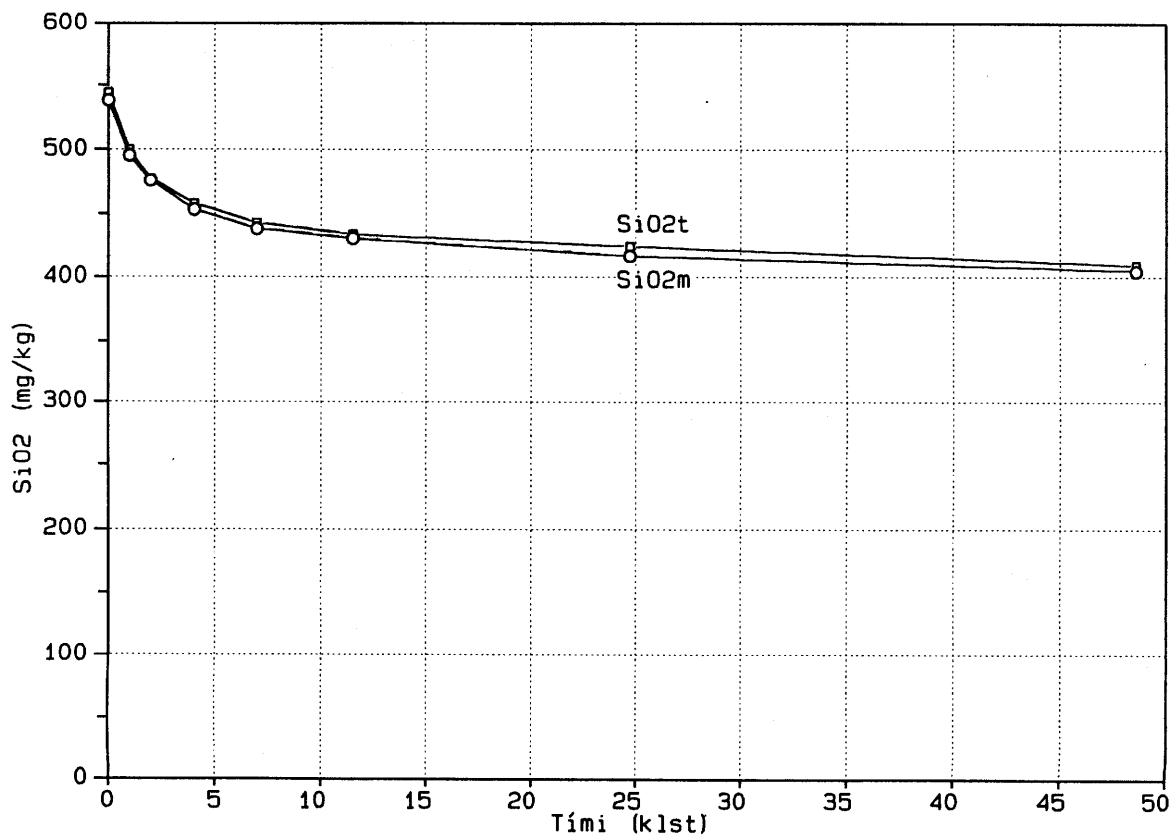
Númer	Tími (klst)	Hitast. (°C)	pH/25	-----Efnastyrkur (mg/kg)-----				Kísill-----				SO4	Cl	TDS	
				Basi (OH)	CO2	H2S	SiO2m	SiO2t	SiO2s	Na	K				Ca
SA7-1	0,00	120,0	5,65	6,2	69,6	0,20	458	461	6360	958	980	0,56			21300
SA7-2	1,50	120,0	5,40				468	475							
SA7-3	2,50	120,0	5,46				465	472							
SA7-4	4,50	120,0	5,51				463	467							
SA7-5	7,50	120,0	5,59				457	465							
SA7-6	12,00	120,0	5,64				450	454							
SA7-7	25,25	120,0	5,82				439	442							
SA7-8	49,08	120,0	5,80				422	422							

**Tafla V1.14** Kísiltílaunir í Svartsengi  
Tílaun SB7, 120°C, 100% háþrýstisjór

Númer	Tími (klst)	Hitast. (°C)	pH/25	-----Efnastyrkur (mg/kg)-----				Kísill-----				SO4	Cl	TDS	
				Basi (OH)	CO2	H2S	SiO2m	SiO2t	SiO2s	Na	K				Ca
SB7-1	0,00	120,0	6,44	11,4	43,9	0,05	538	545	7480	1130	1180	0,66	15100	38,0	24700
SB7-2	1,00	120,0	6,04				495	499							
SB7-3	2,00	120,0	6,12				476	477							
SB7-4	4,00	120,0	6,15				453	458							
SB7-5	7,00	120,0	6,22				438	442							
SB7-6	11,50	120,0	6,28				430	434							
SB7-7	24,75	120,0	6,42				417	424							
SB7-8	48,58	120,0	6,46				405	409							



*Mynd V1.13 Tilraun SA7, 120°C, 85% háþrýstisjór + 15% þéttivatn*



*Mynd V1.14 Tilraun SB7, 120°C, 100% háþrýstisjór*





## **VIÐAUKI 2**

**NIÐURSTÖÐUR TILRAUNA  
JAFNVÆGISSTYRKUR KÍSILS**



## V2 Jafnvægisstyrkur kísils

Stálhylki voru fyllt með jarðsjó úr háþrýstiskilju og lágþrýstiskilju og látin hringrása í 6 daga, fyrst við 120°C og síðan 100°C, 80°C og 60°C. Sýni voru tekin að hverju tímabili loknu og kísilstyrkur og sýrustig mæld. Í upphafi tilrauna voru tekin sýni til mælinga á seltu og kolsýru og einnig til efnagreininga helstu steinefna í jarðsjónum. Hér á eftir eru allar mælingar teknar saman í töflum.

Í töflunum eru einnig birtar mælingar á kísilstyrk sem gerðar voru á Orkustofnun til samanburðar.

**Tafla V2.1** Kísilttilraunir í Svartsengi  
Tilraun SA8, 100% háþrýstisjór, 4x6 dagar

Númer	Tími (klst)	Hitast. (°C)	pH/25	----Efnastyrkur (mg/kg)-----						SO4	Cl	TDS			
				Basi (OH)	CO2	H2S	SiO <sub>2</sub> m Kemía	Orkustofnun	Na				K	Ca	Mg
SA8-1	0,00	120,4	6,81	13,5	40,6	0,30	535	536	7480	1130	1190	0,72	15100	37,0	24700
SA8-2	149,00	120,4	6,79				394	393							
SA8-3	286,25	99,0	6,84				314	310							
SA8-4	429,92	80,3	6,83				261	258							
SA8-5	598,50	61,3	6,91				214	209							

**Tafla V2.2** Kísilttilraunir í Svartsengi  
Tilraun SB8, 100% lágrýstisjór, 4x6 dagar

Númer	Tími (klst)	Hitast. (°C)	pH/25	----Efnastyrkur (mg/kg)-----						SO4	Cl	TDS			
				Basi (OH)	CO2	H2S	SiO <sub>2</sub> m Kemía	Orkustofnun	Na				K	Ca	Mg
SB8-1	0,00	121,0	7,79	14,9	24,0	0,05	552	549	8720	1310	1390	0,77	17400	42,9	28390
SB8-2	149,00	121,0	7,74				398	391							
SB8-3	286,25	99,8	7,76				315	308							
SB8-4	429,92	79,7	7,78				253	249							
SB8-5	598,50	61,0	7,82				207	204							