

Skýrsla nr. 2018-024

20.09.2018



Óvissugreining CO_2 losunar frá virkjunum

Útblástur frá Hellisheiðarvirkjun skoðaður í þaula

Arna Sigurðardóttir & Pétur Már Gíslason

Umsjón: Guðleifur M. Kristmundsson, Þróun

Útgefandi: Orkuveita Reykjavíkur
Umsjón og ábyrgð: Guðleifur M. Kristmundsson

Skráningarblað skýrslna

Skýrsla nr. 2018-024	Útgáfudagur 20.9.2018	Útgáfustaður Reykjavík
Heiti skýrslu Óvissugreining CO₂ losunar frá virkjunum		
Upplag pdf	Fjöldi síðna 15	Dreifing
Höfundur/ar Arna Sigurðardóttir & Pétur Már Gíslason		Verknúmer 10017757
Unnið fyrir Orkuveitu Reykjavíkur		Samvinnuaðilar
Útdráttur <p>Undanfarin ár hefur Orkuveita Reykjavíkur birt koltvíoxíðlosun samstæðunnar í umhverfisskýrslum fyrirtækisins. Vakið hefur athygli að koltvíoxíðlosun frá virkjunum er birt með nákvæmni upp á eitt tonn og árið 2017 var CO₂ losun frá Hellisheiðarvirkjun sögð vera 23.555 tonn. Þessi skýrsla er ítarleg skoðun á því hvernig sú tala var reiknuð og mat lagt á óvissu allra mældra stærða. Óvissa afleiddra stærða er síðan reiknuð með hefðbundnum aðferðum til þess að fá að lokum óvissu heildarlosunarinnar. Mælistærðir frá árinu 2017 voru settar inn í óvissulíkan sem gert var samhliða rannsókninni til þess að fá tölulegar niðurstöður um óvissuna. Niðurstaðan er sú að heildaróvissan í CO₂ losun frá Hellisheiðarvirkjun er um 5% eða 1000 tonn og því réttara að birta heildarlosunina árið 2017 sem 24.000 (±1000) tonn.</p>		
Efnisorð Koltvíoxíð, útblástur, umhverfismál, óvissa, óvissureikningar		Yfirfarið

Efnisyfirlit

1 Inngangur	1
2 Aðferðafræði.....	1
3 Fræði	2
4 Meginmál.....	3
4.1 Undirbúningur og sýnataka.....	3
4.2 Efnagreining.....	5
4.3 Styrkurinn reiknaður.....	8
4.3.1 Sýnataka í vélum	8
4.3.2 Sýnataka á lásvatni	9
4.3.3 Sýnataka í niðurdælingu.....	9
4.4 Flæðismælingar	11
4.5 Heildarlosunin reiknuð	11
4.6 Óvissulíkan	12
5 Niðurstöður.....	13
5.1 Athugasemdir og tillögur að lagfæringum.....	13
6 Heimildir.....	15
Viðauki, skýrsla Urðar Dísar	16

Myndir

Mynd 1. Brot úr töflu úr ársskýrslu OR samstæðunnar 2017 (Orkuveita Reykjavíkur, 2018).....	1
Mynd 2. Skýringarmynd af flæði gass um Hellsheiðarvirkjun 2017. (Bostock, 2018)	2

Töflur

Tafla 1. Breytur og óvissur þeirra, mældar stærðir og fastar í undirbúningi og sýnatöku.	4
Tafla 2. Breytur og óvissur þeirra, afleiddar stærðir í undirbúningi og sýnatöku.....	5
Tafla 3. Breytur og óvissur þeirra, mældar stærðir og fastar í efnagreiningu.....	6
Tafla 4. Breytur og óvissur þeirra, afleiddar stærðir í efnagreiningu.	7
Tafla 5. Breytur og óvissur þeirra, afleiddar stærðir í styrkútreikningum. Sýnataka í vélum.....	8
Tafla 6. Breytur og óvissur þeirra, afleiddar stærðir í styrkútreikningum. Sýnataka á lásvatni.	9
Tafla 7. Breytur og óvissur þeirra, afleiddar stærðir í styrkútreikningum. Sýnataka í niðurdælingu.	10
Tafla 8. Breytur og óvissur þeirra, mældar stærðir í flæðismælingum.....	11

Tafla 9. Breytur og óvissur þeirra, reiknaðar stærðir í heildarlosun.	12
Tafla 10. Niðurstöður úr óvissulíkani, mikilvægar breytur og óvissur þeirra.	12

1 Inngangur

Undanfarin ár hefur Orkuveitan gefið út umhverfisskýrslu sem meðal annars inniheldur upplýsingar um losun gróðurhúsalofttegunda samstæðunnar (sjá Mynd 1). Vakið hefur athygli hversu nákvæmar tölur eru birtar þar, sérstaklega koltvíoxíð (CO₂) losun frá virkjunum sem er birt með nákvæmni upp á eitt tonn en heildarlosun frá virkjunum nemur um 40 þúsund tonnum. Þá vöknudu spurningar um það hversu áreiðanlegar þessar tölur eru, þ.e. hvaða óvissa er fólgin í útreikningi þeirra, og þar með hvort ekki sé rétt að birta þær þannig að framsetningin endurspegli þá óvissu sem óhjákvæmilega fylgir mælingum og útreikningum í svo flóknu kerfi sem hér um ræðir. Þar sem útblástur frá virkjunum er langstærsti hlutur heildarlosunarinnar var ákveðið að byrja þar, taka saman hvernig tölurnar eru reiknaðar og út frá hvaða gögnum.

LOFTTEGUND	UPPRUNI	EINING	2015	2016	2017
Koltvíoxíð (CO ₂)	Nesjavellir	tonn	14.726	14.655	14.020
	Hellisheiði og Hverahlíð	tonn	33.077	26.102	23.555
	Lághitasvæði	tonn	0	0	0
	Aðveitu- og dreifikerfi	tonn	5	2	3
	Bílafloti, eigin bílar og leigðir bílar (CO ₂ ígildi)	tonn	582	551	526
	Flugferðir starfsmanna (CO ₂ ígildi)	tonn	70	64	69
	Skrifstofuúrgangur til urðunar (CO ₂ ígildi)	tonn	14	11	18
	Úrgangur frá verkstað til urðunar (CO ₂ ígildi)	tonn	799	651	818
	Lífænn úrgangur til moltugerðar (CO ₂ ígildi)	tonn	5	4	5
	Samtals CO₂		tonn	49.278	42.040

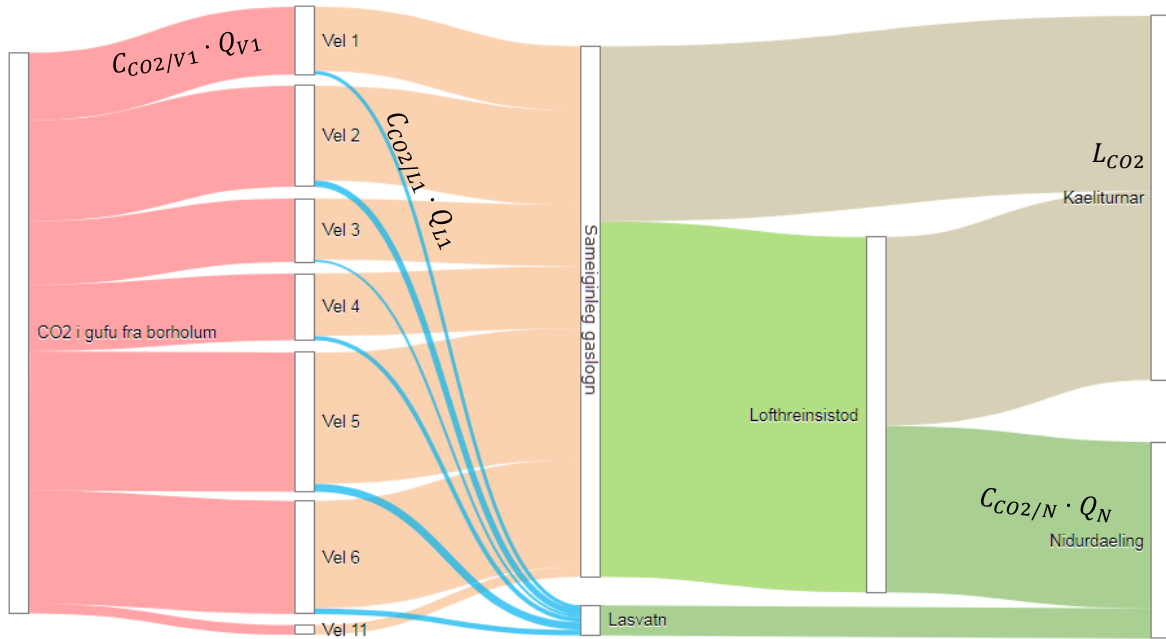
Mynd 1. Brot úr töflu úr ársskýrslu OR samstæðunnar 2017 (Orkuveita Reykjavíkur, 2018).

2 Aðferðafræði

Þegar koltvíoxíðlosunin frá virkjunum er reiknuð þarf annars vegar að finna flæði þess gass sem sleppur út í umhverfið og hins vegar CO₂ styrk þess. Magn koltvíoxíðs sem sleppur út í umhverfið er þá einfaldlega margfeldi gasflæðisins eða gasmagnisins og CO₂ styrks þess. Til þess að átta okkur betur á þeim stærðum sem koma að þessum útreikningum skulum við skoða ferðalag gufunnar í gegnum Hellsheiðarvirkjun. Gufa úr borholum safnast saman inn á vélar þar sem túrbínnum er snúið og rafmagnið er framleitt. Eftir það þéttist vatnsgufan og gasið (CO₂, H₂S, H₂, CH₄, O₂, N₂) greinist frá gufunni. Hluti af gasinu fer í kæliturna þar sem það losnar út í umhverfið, hluti þess leysist upp í lásvatni og hluti fer í lofthreinsistöð þar sem um helmingurinn leysist upp í vatni og fer í niðurdælingu (CarbFix/SulFix). Afgangurinn sleppur út í andrúmsloftið (sjá Mynd 2).

Flæðismælar eru við hverja vél sem mæla hversu mikil gufa fer inn á vélarnar. Þar eru einnig tekin sýni til efnagreiningar. Tekin eru tvö sýni úr hverri vél, fjórum sinnum á ári og styrkur CO₂ og H₂S í gufunni mældur. Magn lásvatnsins er einnig mælt og CO₂ styrkur þess er mældur með sýnatöku eins og í vélunum. Flæðismælir er líka við niðurdælinguna þar sem einnig eru tekin sýni fjórum sinnum á ári til efnagreiningar. Á Hellsheiði eru 7 vélar, vélar 1-6 og lágþrýstivél 11. Á Nesjavöllum eru fjórar vélar en þar eru sýni tekin úr vélum 1 og 2 saman og úr vélum 3 og 4 saman auk þess sem flæði þeirra er mælt saman. Í þessari skýrslu verður einungis fjallað um ferlið í Hellsheiðarvirkjun en líklegt er að niðurstöðurnar megi heimfæra yfir á Nesjavallavirkjun hvað óvissu á CO₂ losun varðar.

Hellisheidarvirkjun 2017



Mynd 2. Skýringamynd af flæði gass um Hellisheidarvirkjun 2017. (Bostock, 2018)

Byrjað var á verkefninu sumarið 2016 þegar Urður Dís Árnadóttir, þáverandi sumarstarfsmaður, áætlaði óvissu sýnatöku og efnagreiningar (sjá Viðauka). Í kjölfar þeirrar athugunar var aðferðum við sýnatöku breytt til þess að draga úr óvissu. Hér er því annarri aðferð beitt við sýnatökur en í skýrslu Urðar Dísar og því verður farið aftur yfir það ferli auk þess sem öll önnur skref í útblástursreikningunum verða skoðuð til þess að leggja mat á heildaróvissu CO₂ losunar frá virkjunum.

3 Fræði

Almennt gildir fyrir stærð U sem er fall af breytunum A, B, C, \dots sem allar hafa óvissu að óvissa hennar er metin með

$$\Delta U = \sqrt{\left(\frac{\partial U}{\partial A}\right)^2 (\Delta A)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial B}\right)^2 (\Delta B)^2 + \left(\frac{\partial U}{\partial C}\right)^2 (\Delta C)^2 + \dots}$$

Fyrir samlagningu, $U = A + B$, verður jafnan einfaldlega,

$$\Delta U = \sqrt{(\Delta A)^2 + (\Delta B)^2}.$$

Hlutfallsóvissa fyrir samlagningu er því,

$$\Delta_{\%} U = \frac{\Delta U}{U} = \frac{\sqrt{(\Delta A)^2 + (\Delta B)^2}}{U} = \sqrt{\frac{(\Delta A)^2 + (\Delta B)^2}{U^2}}.$$

Fyrir margföldun, $U = AB$, höfum við að

$$\frac{\partial U}{\partial A} = B \quad \text{og} \quad \frac{\partial U}{\partial B} = A$$

og því verður jafnan,

$$\Delta U = U \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2}.$$

Fyrir deilingu, $U = \frac{A}{B}$, höfum við að,

$$\frac{\partial U}{\partial A} = \frac{1}{B} \quad \text{og} \quad \frac{\partial U}{\partial B} = -\frac{A}{B^2}$$

og með smá algebru fæst sama niðurstaða og fyrir margföldunina,

$$\Delta U = U \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2}.$$

Hlutfallsóvissa fyrir margföldun og deilingu verður því einfaldlega

$$\Delta_{\%} U = \frac{\Delta U}{U} = \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2}.$$

(Scuro, 2004)

4 Ferlar og reikniaðferðir

Ferlið skiptist í nokkra hluta, þrjár mismunandi sýnatökur eru gerðar (á gufu í vélum, lásvatni og niðurdælingarvatni) til þess að greina styrk CO_2 á viðeigandi stað. Sýnatökuferlinu má skipta upp í undirbúning og sýnatöku, efnagreiningu og útreikninga á styrk CO_2 . Gert er ráð fyrir að sýnatökurnar og efnagreiningarnar á sýnunum séu eins milli mælistaða og hafi því sömu óvissu. Næst eru teknar saman allar flæðismælingar í kerfinu og að lokum er heildarlosunin reiknuð.

Óvissulíkan var gert til þess að leggja tölulegt mat á óvissuna þar sem raunverulegar mælistærðir voru notaðar og óvissa hvernar stærðar reiknuð samkvæmt jöfnum sem leiddar eru út í eftirfarandi kafla.

4.1 Undirbúningur og sýnataka

Sýnatökuflöskurnar eru undirbúnar áður en farið er með þær upp í virkjun. Byrjað er á að vigta þær tómar, síðan eru 10 ml af basa (60% KOH lausn) bætt út í. Næst er hver flaska tengd við lofttæmingardælu sem látin er ganga í u.þ.b 10 mín áður en þær eru vigtaðar aftur. Því næst eru gufusýni úr vélum tekin og sett í flöskurnar.¹ Þær eru síðan vigtaðar aftur eftir sýnatöku. Viðeigandi breytuheiti og óvissur á mældum stærðum úr þessum hluta má sjá í Töflu 1.

Notast er við tvö mismunandi gildi á eðlismassa KOH lausnarinnar við útreikninga frá rannsóknarstofu og því eru tvö breytuheiti á eðlismassanum, $\rho_{1/\text{KOH}}$ og $\rho_{2/\text{KOH}}$.² Einnig er hægt að

¹ Athugasemd: Ekki er tekið tillit til mannlegrar óvissu við sýnatökuna sjálfa. Sjá 1) í kafla 5.1.

² Athugasemd: Betra væri að nota bara eitt gildi við útreikningana. Sjá 2) í kafla 5.1.

mæla eðlismassa KOH lausnarinnar með því að vigta ákveðið rúmmál af lausninni og þá ræðst óvissan einungis af óvissu vigtarinnar og rúmmálsóvissu þeirrar mæliflösku sem notuð var (sjá Töflu 1).

Af og til er KOH lausnin sem notuð er við sýnatökuna títruð til þess að mæla magn CO₂ sem uppleyst er í basanum. Þetta er ekki gert reglulega og svipuð niðurstaða fæst í hvert skipti sem títrunin er framkvæmd. Því setjum við magn af uppleystu CO₂ í KOH lausninni sem fasta og ályktum óvissuna út frá niðurstöðum úr óvissureikningum fyrir efnagreininguna.³

Tafla 1. Breytur og óvissur þeirra, mældar stærðir og fastar í undirbúningi og sýnatöku.

Breyta	Lýsing breytu	Óvissa breytu
m_f	Massi tómrar flösku.	$\Delta m_f = 0.01 \text{ g (skv. vigt)}$
$m_{f/KOH}$	Massi flösku með KOH eftir lofttæmingu.	$\Delta m_{f/KOH} = 0.01 \text{ g (skv. vigt)}$
$m_{f/s}$	Massi flösku með sýni.	$\Delta m_{f/s} = 0.01 \text{ g (skv. vigt)}$
$\rho_{1/KOH} = 1,4 \text{ g/ml}$	Eðlismassi nr. 1 fyrir KOH lausn.	$\Delta\% \rho_{1/KOH} = \sqrt{\left(\frac{ \rho_{KOH} - \rho_{1/KOH} }{\rho_{KOH}}\right)^2 + (\Delta\% \rho_{KOH})^2}$
$\rho_{2/KOH} = 1,373 \text{ g/ml}$	Eðlismassi nr. 2 fyrir KOH lausn.	$\Delta\% \rho_{2/KOH} = \sqrt{\left(\frac{ \rho_{KOH} - \rho_{2/KOH} }{\rho_{KOH}}\right)^2 + (\Delta\% \rho_{KOH})^2}$
$\rho_{KOH} = m_{mælt}/V_{mælt}$	Mældur eðlismassi KOH lausnar þar sem $\Delta m_{mælt}$ er óvissa massans og $\Delta V_{mælt}$ óvissa rúmmálsins.	$\Delta\% \rho_{KOH} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m_{mælt}}{m_{mælt}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{mælt}}{V_{mælt}}\right)^2}$
$C_{CO_2-KOH} = 594 \text{ mg/l}$	Magn CO ₂ uppleyst í basanum fyrir sýnatöku.	$\Delta\% C_{CO_2-KOH} = 2\%$ (ályktað skv. niðurstöðum úr efnagreiningu)

Massi KOH í flösku er því einfaldlega,

$$m_{KOH} = m_{f/KOH} - m_f$$

og rúmmál basans þar af leiðandi,

$$V_{KOH} = \frac{m_{KOH}}{\rho_{1/KOH}}$$

og því er massi vatnsgufu sem var tekinn í flöskuna,

³ Athugasemd: Ekki er alltaf sama KOH lausn notuð og því væri ráð að títra lausnina í hvert sinn sem ný er blönduð. Sjá 3) í kafla 5.1.

$$m_{vg} = m_{f/s} - m_f - V_{KOH} \cdot \rho_{2/KOH} \quad 4$$

Hlutfall KOH í sýninu er

$$r_{KOH} = \frac{V_{KOH}}{m_{vg} + V_{KOH}} \quad 5$$

og þá er hægt að skilgreina þynningarstuðul vegna basans KOH,

$$pVB = \frac{m_{vg} + V_{KOH}}{m_{vg}} = \frac{1}{1 - r_{KOH}}$$

sem notaður er í útreikningum eftir efnagreiningu sýnisins. Óvissur þessara afleiddu stærða má sjá í Töflu 2.

Tafla 2. Breytur og óvissur þeirra, afleiddar stærðir í undirbúningi og sýnatöku.

Breyta	Lýsing breytu	Óvissa breytu
m_{KOH}	Massi KOH í flösku.	$\Delta\%m_{KOH} = \sqrt{\frac{(\Delta m_{f/KOH})^2 + (\Delta m_f)^2}{(m_{KOH})^2}}$
V_{KOH}	Reiknað rúmmál KOH.	$\Delta\%V_{KOH} = \sqrt{(\Delta\%m_{KOH})^2 + (\Delta\%\rho_{1/KOH})^2}$
m_{vg}	Reiknaður massi gufu sem var tekinn í flöskuna.	$\Delta\%m_{vg} = \sqrt{\left(\left \frac{\left(1 - \frac{\rho_{2/KOH}}{\rho_{1/KOH}}\right)(m_f - m_{f/KOH})}{m_{f/s} - m_{f/KOH}}\right \right)^2 + \frac{(\Delta m_{f/s})^2 + (\Delta m_{f/KOH})^2}{(m_{f/s} - m_{f/KOH})^2}}$
r_{KOH}	Hlutfall KOH í sýni.	$\Delta\%r_{KOH} = (1 - r_{KOH}) \sqrt{(\Delta\%m_{vg})^2 + (\Delta\%V_{KOH})^2}$
pVB	Þynning vegna basa.	$\Delta\%pVB = \left(1 - \frac{1}{pVB}\right) \sqrt{(\Delta\%m_{vg})^2 + (\Delta\%V_{KOH})^2}$

4.2 Efnagreining

Efnagreiningin er framkvæmd með Metrohm 905 Titrandó titrator sem greinir bæði styrk CO₂ og H₂S í sýninu. Titratorinn hefur bæði sýru (HCl) og basa (NaOH) skammtara (10 ml) og geymir upplýsingar um rúmmál hvors um sig á hverjum tímapunkti. Titratorinn hefur einnig AgNO₃ skammtara. Stærsta kerfisbundna óvissa fyrir 10 ml skammtara er 20 µl en mesta tilviljanakennda óvissa er 7 µl. (Metrohm, 2018)

⁴ Athugasemd: hér væri e.t.v. betra að nota: $m_{vg} = m_{f/s} - m_f - m_{f/KOH}$. Sjá 4) í kafla 5.1.

⁵ Athugasemd: hér er verið að blanda saman massa og rúmmáli í hlutfallsreikningi og þ.a.l. að gera ráð fyrir að eðlismassi vatnsgufunnar sé 1g/ml. Sjá 5) í kafla 5.1

Byrjað er á því að taka 2 ml af sýni með 100-1000 μl pípettu og það þynnt út í 50 ml með afjónuðu vatni. Pípettan hefur kerfisbundna óvissu upp á 0.6% við 1ml og tilviljanakennda óvissu upp á 0.2%. Óvissa á rúmmáli sýnis miðað við að tekinn sé alltaf 1 ml í einu má sjá í Töflu 3.

Títuratorinn byrjar á að títra H_2S með 0,02 M AgNO_3 lausn en við það myndast Ag_2S á föstu formi. Þegar allur brennisteinn í sýninu er horfinn úr sýninu er endapunktur þessarar títrunar náð. Næst títrar hann CO_2 með HCl frá pH 8,3 – 4,5 en við pH 4,5 er allt uppleyst CO_2 í lausninni á forminu H_2CO_3 (aq). Efnagreiningin byggir síðan á því að vita hversu mikið af sýru þarf til þess að lækka sýrustigið niður í pH 4,5. Sýnið er síðan afgasað með Argoni í u.þ.b 5 mínútur til þess að losna við allt CO_2 og H_2S úr lausninni. Að lokum er sýnið baktítrað með NaOH frá pH 4,5 – 8,3 til þess að ákvarða magn þeirra efna fyrir utan CO_2 sem hvarfast við sýruna (HCl). Magn basans (NaOH) er þá dregið frá magni sýrunnar þegar styrkur CO_2 er reiknaður (Orkuveita Reykjavíkur, 2015). Viðeigandi breytuheiti og óvissur á mældum stærðum úr þessum hluta má sjá í Töflu 3.

Tafla 3. Breytur og óvissur þeirra, mældar stærðir og fastar í efnagreiningu.

Breyta	Lýsing breytu	Óvissa breytu
V_{HClx}	Rúmmál sýru í títrator á tímamarki x.	$\Delta V_{HClx} = \sqrt{\left(\frac{0.020 \text{ ml}}{10 \text{ ml}} V_{HClx}\right)^2 + (0.007 \text{ ml})^2}$
V_{NaOHx}	Rúmmál basa í títrator á tímamarki x.	$\Delta V_{NaOHx} = \sqrt{\left(\frac{0.020 \text{ ml}}{10 \text{ ml}} V_{NaOHx}\right)^2 + (0.007 \text{ ml})^2}$
$V_{sýni}$	Rúmmál sýnis.	$\Delta\% V_{sýni} = \frac{\sqrt{\frac{V_{sýni}}{1 \text{ ml}} \left((0.006 \text{ ml})^2 + (0.002 \text{ ml})^2\right)}}{(V_{sýni})^2}$
$C_{HCl} = 0.1 \text{ M}$	Styrkur sýrulausnar.	$\Delta C_{HCl} = 0.2\%$ (HoneyWell, 2018)
$C_{NaOH} = 0.1 \text{ M}$	Styrkur basalausnar.	$\Delta C_{NaOH} = 0.2\%$ (HoneyWell, 2018)
$M_{CO_2} = 44 \text{ g/mol}$	Mólmassi CO_2 .	Raunverulegt gildi er 44.0095 g/mol (NIST, Carbon Dioxide, 2017) því er: $\Delta\% M_{CO_2} = \frac{ M_{CO_2} - 44.0095 }{44.0095}$

Skilgreinum breytur fyrir magn sýru og basa sem fer út í sýnið. Rúmmál sýru er

$$V_{HCl} = V_{HCl2} - V_{HCl1}$$

og rúmmál basa,

$$V_{NaOH} = V_{NaOH2} - V_{NaOH1}$$

Mólfjöldi HCl í sýninu er

$$n_{HCl} = V_{HCl} \cdot C_{HCl}$$

og mólfjöldi NaOH í sýninu

$$n_{NaOH} = V_{NaOH} \cdot C_{NaOH}$$

Formúlan sem títratorinn notar til þess að finna CO₂ lút, þ.e. styrk CO₂ í KOH basanum er eftirfarandi,⁶

$$C_{CO_2-Lútur} = \frac{((V_{HCl2} - V_{HCl1}) \cdot C_{HCl} - (V_{NaOH2} - V_{NaOH1}) \cdot C_{NaOH}) \cdot M_{CO_2}}{V_{sýni}}$$

sem einnig er hægt að skrifa sem

$$C_{CO_2-Lútur} = \frac{(n_{HCl} - n_{NaOH}) \cdot M_{CO_2}}{V_{sýni}}$$

Styrkur CO₂ í sýninu er þá

$$C_{CO_2-gufa} = \text{pVB} \cdot (C_{CO_2-Lútur} - r_{KOH} \cdot C_{CO_2-KOH})$$

Óvissur þessara afleiddu stærða má sjá í töflu 4.

Tafla 4. Breytur og óvissur þeirra, afleiddar stærðir í efnagreiningu.

Breyta	Lýsing breytu	Óvissa breytu
V_{HCl}	Rúmmál HCl í sýni.	$\Delta_{\%} V_{HCl} = \sqrt{\frac{\left(\frac{0.020 \text{ ml}}{10 \text{ ml}}\right)^2 ((V_{HCl1})^2 + (V_{HCl2})^2) + 2(0.007 \text{ ml})^2}{(V_{HCl2} - V_{HCl1})^2}}$
V_{NaOH}	Rúmmál NaOH í sýni.	$\Delta_{\%} V_{NaOH} = \sqrt{\frac{\left(\frac{0.020 \text{ ml}}{10 \text{ ml}}\right)^2 ((V_{NaOH1})^2 + (V_{NaOH2})^2) + 2(0.007 \text{ ml})^2}{(V_{NaOH1} - V_{NaOH2})^2}}$
n_{HCl}	Mólfjöldi HCl í sýni.	$\Delta_{\%} n_{HCl} = \sqrt{(\Delta_{\%} V_{HCl})^2 + (\Delta_{\%} C_{HCl})^2}$
n_{NaOH}	Mólfjöldi NaOH í sýni.	$\Delta_{\%} n_{NaOH} = \sqrt{(\Delta_{\%} V_{NaOH})^2 + (\Delta_{\%} C_{NaOH})^2}$
$(n_{HCl} - n_{NaOH})$	Mismunur mólfjölda sýru og basa í sýni.	$\Delta_{\%} (n_{HCl} - n_{NaOH}) = \sqrt{\frac{(\Delta_{\%} n_{HCl})^2 (V_{HCl})^2 + (\Delta_{\%} n_{NaOH})^2 (V_{NaOH})^2}{(V_{HCl} - V_{NaOH})^2}}$
$C_{CO_2-Lútur}$	CO ₂ lútur, þ.e. CO ₂ uppleyst í basa	$\Delta_{\%} C_{CO_2-Lútur} = \sqrt{\Delta_{\%} (n_{HCl} - n_{NaOH})^2 + (\Delta_{\%} M_{CO_2})^2 + (\Delta_{\%} V_{sýni})^2}$

⁶ Athugasemd: Ekki er tekið tillit til rafskautanna, en þau gefa til kynna hvenær títratorinn eigi að hætta að títra og hafa í raun töluverð áhrif á títrunina. Einnig getur CO₂ losað út andrúmsloft úr sýninu þegar styrkur CO₂ í sýni er hár. Sjá 6) í kafla 5.1.

C_{CO_2-gufa}	Styrkur CO ₂ í gufunni	$\Delta\%C_{CO_2-gufa} =$
$\sqrt{\frac{(\rho VB C_{CO_2-Litir})^2 ((\Delta\% \rho VB)^2 + (\Delta\% C_{CO_2-Litir})^2) + (\rho VB r_{KOH} C_{CO_2-KOH})^2 ((\Delta\% \rho VB)^2 + (\Delta\% r_{KOH})^2 + (\Delta\% C_{CO_2-KOH})^2)}{(\rho VB(C_{CO_2-Litir} - r_{KOH} C_{CO_2-KOH}))^2}}$		

4.3 Styrkurinn reiknaður

Sýnatökur eins og þær sem lýst er hér að ofan fara fram á gufu í vélum og svipaðar sýnatökur fara fram á lásvatni og á niðurdælingarvatni. Gert er ráð fyrir að niðurstaða á óvissu í efnagreiningu eigi við allar tegundir sýnataka. Þegar fjórum sýnatökum yfir árið er lokið er lagt mat á meðalstyrk CO₂ á hverjum stað fyrir sig og er því ferli lýst hér að neðan.

4.3.1 Sýnataka í vélum

Styrkur CO₂ í hverri flösku (hverju sýni) er reiknaður eins og greint er frá hér að framan. Tekin eru tvö sýni í hverri vél, fjórum sinnum á ári og hvert sýni er greint tvisvar. Skilgreinum breytuheit þannig að n er númer sýnatöku, x er númer vélar, y er númer sýnis og z númer mælingar (efnagreiningar) á sýninu. Þá hefur sérhver mæling sem fékk heitið C_{CO_2-gufa} í kafla 4.2 auðkenni sem þetta:

$$nC_{CO_2/Vx-y-z}$$

Meðaltal mælinganna tveggja er síðan notað sem styrkur CO₂ í flösku y ,

$$nC_{CO_2/Vx-y} = \frac{1}{z_{max}} \sum_{z=1}^{z_{max}} nC_{CO_2/Vx-y-z}$$

Meðalgildi CO₂ í öllum flöskum er síðan notað sem styrkur CO₂ í vél x á gefnum tímapunkti,

$$nC_{CO_2/Vx} = \frac{1}{y_{max}} \sum_{y=1}^{y_{max}} nC_{CO_2/Vx-y}$$

Meðaltal úr öllum sýnatökum er síðan notað sem styrkur CO₂ í vél x yfir allt tímabilið (árið),

$$C_{CO_2/Vx} = \frac{1}{n_{max}} \sum_{n=1}^{n_{max}} nC_{CO_2/Vx}$$

Þar sem rekstrarástand virkjunarinnar getur verið mismunandi yfir tímabilið, þ.e. mismunandi borholum er veitt inn á mismunandi vélar, er meðaltal sýnatakanna ekki tekið til þess að fá betra mat á ákveðið gildi á tilteknum tímapunkti heldur er það gert til þess að meta meðalástand virkjunarinnar yfir tímabilið. Því er óvissa þessarar stærðar ekki reiknuð með sama hætti og hinar heldur er stærsta óvissa á sýnatöku úr einni vél á gefnum tímapunkti notuð til þess að leggja mat á óvissu meðalstyrksins. Breytur og óvissur þeirra úr þessum hluta má sjá í Töflu 5.

Tafla 5. Breytur og óvissur þeirra, afleiðdar stærðir í styrkútreikningum. Sýnataka í vélum.

Breyta	Lýsing breytu	Óvissa
$nC_{CO_2/Vx-y-z}$	Styrkur CO ₂ í sýnatöku n í vél x , sýni y , mæling z .	Sjá niðurstöðu úr efnagreiningu ($\Delta\%C_{CO_2-gufa}$)

$nC_{CO_2/Vx-y}$	Styrkur CO ₂ í sýnatöku n í vél x , sýni y .	$\Delta\%nC_{CO_2/Vx-y} = \sqrt{\frac{\sum_{z=1}^{z_{max}} (nC_{CO_2/Vx-y-z})^2 (\Delta\%nC_{CO_2/Vx-y-z})^2}{(\sum_{z=1}^{z_{max}} nC_{CO_2/Vx-y-z})^2}}$
$nC_{CO_2/Vx}$	Meðalstyrkur CO ₂ í sýnatöku n í vél x .	$\Delta\%nC_{CO_2/Vx} = \sqrt{\frac{\sum_{y=1}^{y_{max}} (nC_{CO_2/Vx-y})^2 (\Delta\%nC_{CO_2/Vx-y})^2}{(\sum_{y=1}^{y_{max}} nC_{CO_2/Vx-y})^2}}$
$C_{CO_2/Vx}$	Meðalstyrkur CO ₂ í vél x úr öllum sýnatökum.	$\Delta\%C_{CO_2/Vx} = \max_{1 \leq n \leq n_{max}} (\Delta\%nC_{CO_2/Vx})$

4.3.2 Sýnataka á lásvatni

Líkt og í sýnatöku á vélunum eru tvö sýni á lásvatni tekin hjá hverri vél, fjórum sinnum á ári og hvert sýni er greint tvisvar. Skilgreinum breytuheiti eins og í kafla 4.3.1 og gefum sérhverri mælingu eftirfarandi auðkenni,

$$nC_{CO_2/Lx-y-z}$$

Aðrar breytur og óvissur þeirra má sjá í Töflu 6, en reikningarnir fara fram eins og í hluta 4.3.1.

Tafla 6. Breytur og óvissur þeirra, afleiddar stærðir í styrkútreikningum. Sýnataka á lásvatni.

Breyta	Lýsing breytu	Óvissa
$nC_{CO_2/Lx-y-z}$	Styrkur CO ₂ í sýnatöku n í vél x , sýni y , mæling z .	Sjá niðurstöðu úr efnagreiningu ($\Delta\%C_{CO_2-gufa}$)
$nC_{CO_2/Lx-y}$	Styrkur CO ₂ í sýnatöku n í vél x , sýni y .	$\Delta\%nC_{CO_2/Lx-y} = \sqrt{\frac{\sum_{z=1}^{z_{max}} (nC_{CO_2/Lx-y-z})^2 (\Delta\%nC_{CO_2/Lx-y-z})^2}{(\sum_{z=1}^{z_{max}} nC_{CO_2/Lx-y-z})^2}}$
$nC_{CO_2/Lx}$	Meðalstyrkur CO ₂ í sýnatöku n á lásvatni hjá vél x .	$\Delta\%nC_{CO_2/Lx} = \sqrt{\frac{\sum_{y=1}^{y_{max}} (nC_{CO_2/Lx-y})^2 (\Delta\%nC_{CO_2/Lx-y})^2}{(\sum_{y=1}^{y_{max}} nC_{CO_2/Lx-y})^2}}$
$C_{CO_2/Lx}$	Meðalstyrkur CO ₂ í lásvatni hjá vél x úr öllum sýnatökum.	$\Delta\%C_{CO_2/Lx} = \max_{1 \leq n \leq n_{max}} (\Delta\%nC_{CO_2/Lx})$

4.3.3 Sýnataka í niðurdælingu

Við niðurdælinguna eru tvær þjöppur sem þjappa gasinu í vatnið áður en því er dælt niður. Þegar báðar þjöppurnar eru í gangi er styrkur CO₂ í niðurdælingarvatninu hærri en þegar ein þjappa er í gangi og þegar slökkt er á báðum þjöppunum er styrkur CO₂ í vatninu hverfandi. Í sýnatöku eru annars vegar tekin sýni með báðar þjöppurnar í gangi og hins vegar með aðra þeirra í gangi. Gert

er ráð fyrir því að þjöppurnar séu eins og því skiptir ekki máli hvorri er slökkt á. Þetta er gert vegna þess að í rekstrinum slökknar af og til á annarri þjöppunni og stundum á báðum.

Tekin eru fjögur sýni á niðurdælingarvatni (tvö með báðar þjöppur í gangi og tvö með aðra í gangi), fjórum sinnum á ári og hvert sýni er greint tvisvar. Skilgreinum breytuheit þannig að i er fjöldi þjappa sem er í gangi, n er númer sýnatöku, y er númer sýnis og z númer mælingar (efnagreiningar) á sýninu. Þá hefur sérhver mæling sem fékk heitið C_{CO_2-gufa} í kafla 4.2 auðkenni sem þetta:

$$nC_{CO_2/Ni-y-z}$$

Meðaltal mælinganna tveggja er síðan notað sem styrkur CO₂ í flösku y ,

$$nC_{CO_2/Ni-y} = \frac{1}{z_{max}} \sum_{z=1}^{z_{max}} nC_{CO_2/Ni-y-z}$$

Meðalgildi CO₂ í öllum flöskunum er síðan notað sem styrkur CO₂ á gefnum tímamarki,

$$nC_{CO_2/Ni} = \frac{1}{y_{max}} \sum_{y=1}^{y_{max}} nC_{CO_2/Ni-y}$$

Meðaltal úr öllum sýnatökum er síðan notað sem styrkur CO₂ yfir allt tímabilið (árið),

$$C_{CO_2/Ni} = \frac{1}{n_{max}} \sum_{n=1}^{n_{max}} nC_{CO_2/Ni}$$

Óvissur þessara breyta má sjá í Töflu 7.

Tafla 7. Breytur og óvissur þeirra, afleiddar stærðir í styrkútreikningum. Sýnataka í niðurdælingu.

Breyta	Lýsing breytu	Óvissa
$nC_{CO_2/Ni-y-z}$	Styrkur CO ₂ í sýnatöku n , sýni y , mæling z með i þjöppur í gangi.	Sjá niðurstöðu úr efnagreiningu ($\Delta\%C_{CO_2-gufa}$)
$nC_{CO_2/Ni-y}$	Styrkur CO ₂ í sýnatöku n , sýni y með i þjöppur í gangi.	$\Delta\%nC_{CO_2/Ni-y} = \sqrt{\frac{\sum_{z=1}^{z_{max}} (nC_{CO_2/Ni-y-z})^2 (\Delta\%nC_{CO_2/Ni-y-z})^2}{(\sum_{z=1}^{z_{max}} nC_{CO_2/Ni-y-z})^2}}$
$nC_{CO_2/Ni}$	Meðalstyrkur CO ₂ í sýnatöku n með i þjöppur í gangi.	$\Delta\%nC_{CO_2/Ni} = \sqrt{\frac{\sum_{y=1}^{y_{max}} (nC_{CO_2/Ni-y})^2 (\Delta\%nC_{CO_2/Ni-y})^2}{(\sum_{y=1}^{y_{max}} nC_{CO_2/Ni-y})^2}}$
$C_{CO_2/Ni}$	Meðalstyrkur CO ₂ úr öllum sýnatökum með i þjöppur í gangi.	$\Delta\%C_{CO_2/Ni} = \max_{1 \leq n \leq n_{max}} (\Delta\%nC_{CO_2/Ni})$

4.4 Flæðismælingar

Rifjum upp ferðalag gufunnar í gegnum virkjunina á Mynd 2. Gufan fer frá borholunum inn á vélar þar sem hún skiptist í lásvatn, niðurdælingu eða sleppur út í andrúmsloftið. Heildarmagn af CO₂ sem sleppur út í andrúmsloftið má þá reikna með því að draga magn CO₂ í niðurdælingu og í lásvatni frá því magni af CO₂ sem kemur inn á vélarnar.

Flæðismælar eru við hverja vél sem mæla það gufufleði sem fer inn á vélarnar. Þessir mælar hafa uppgefna óvissu 5% við ákveðinn þrýsting en í virkjuninni eru þeir að vinna við annan þrýsting. Þar sem við höfum ekki upplýsingar um þennan þrýstingsmun er uppgefin óvissa mælanna notuð hér.

Lásvatnið fer frá vélunum og inn á lofttæmingardælu og þaðan fer það í niðurdælingu. Flæðismælir mælir rennsli vatnsins áður en það fer í lofttæmingardæluna en í dælunni er gasið sogið úr vatninu og örlítið af vatninu sogast með. Gert er ráð fyrir að flæði vatnsins frá dælunni sé það sama og það sem rennur að henni og því eykur það óvissuna örlítið. Þar sem við höfum ekki frekari upplýsingar um þessa mæla að svo stöddu er óvissa þeirra metin 5% líkt og flæðismælarnir í vélunum.

Rennslismælir er einnig við niðurdælingu og óvissa hans er einnig metin 5% þar sem nákvæmari upplýsingar um hann vatnar. Þjöppurnar í niðurdælingunni senda frá sér gangmerki og því höfum við upplýsingar um hversu margar þjöppur eru í gangi á hverjum tímapunkti. Yfir ákveðið tímabil er því hægt að skilgreina hlutfallsstuðla sem segja til um virknihlutfall þjappa yfir ákveðið tímabil. Köllum þessa stuðla r_i þar sem i er fjöldi þjappa. Ef báðar þjöppurnar eru í gangi yfir allt tímabilið sem skoðað er verða stuðlarnir: $r_0 = 0$, $r_1 = 0$, $r_2 = 1$. Óvissa þessara stuðla er metin sem engin þar sem þjappa getur bara annað hvort verið í gangi eða ekki og gangmerkið sýnir alltaf rétt ástand.

Tafla 8. Breytur og óvissur þeirra, mældar stærðir í flæðismælingum.

Breyta	Lýsing breytu	Óvissa
Q_{Vx}	Gufufleði inn á vél x .	5%
Q_{Lx}	Lásvatnsflæði út af vél x .	5%
Q_N	Flæði niðurdælingar.	5%
r_i	Hlutfall niðurdælingar með i þjöppur í gangi.	0%

4.5 Heildarlosunin reiknuð

Heildarlosun frá virkjunum er það magn af CO₂ sem fer inn á vélarnar mínus það sem fer í lásvatnið og það sem fer í niðurdælingu. Magn (massi á tímaeiningu) fæst með því að margfalda saman flæði og styrk á viðkomandi stað.

Heildarlosunin fæst þá með eftirfarandi jöfnu,

$$L_{CO_2} = \sum_{x=1}^{x_{max}} C_{CO_2/Vx} \cdot Q_{Vx} - \sum_{x=1}^{x_{max}} C_{CO_2/Lx} \cdot Q_{Lx} - \sum_{i=0}^{i_{max}} r_i \cdot C_{CO_2/Ni} \cdot Q_N$$

sem einnig er hægt að skrifa sem,

$$L_{CO_2} = L_{CO_2/V} - L_{CO_2/L} - L_{CO_2/N}$$

Óvissa losunarinnar verður því,

$$\Delta\%L_{CO_2} = \sqrt{\frac{(\Delta\%L_{CO_2/V} \cdot L_{CO_2/V})^2 + (\Delta\%L_{CO_2/L} \cdot L_{CO_2/L})^2 + (\Delta\%L_{CO_2/N} \cdot L_{CO_2/N})^2}{(L_{CO_2})^2}}$$

en óvissu hvers liðar fyrir sig má sjá í Töflu 9.

Tafla 9. Breytur og óvissur þeirra, reiknaðar stærðir í heildarlosun.

Breyta	Lýsing breytu	Óvissa
$L_{CO_2/V}$	Magn af CO ₂ sem fer að vélunum.	$\Delta\%L_{CO_2/V} = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^{x_{max}} \left(C_{CO_2/Vx} \cdot Q_{Vx} \sqrt{(\Delta\%C_{CO_2/Vx})^2 + (\Delta\%Q_{Vx})^2} \right)^2}{(L_{CO_2/V})^2}}$
$L_{CO_2/L}$	Magn af CO ₂ sem er í lásvatni.	$\Delta\%L_{CO_2/L} = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^{x_{max}} \left(C_{CO_2/Lx} \cdot Q_{Lx} \sqrt{(\Delta\%C_{CO_2/Lx})^2 + (\Delta\%Q_{Lx})^2} \right)^2}{(L_{CO_2/L})^2}}$
$L_{CO_2/N}$	Magn CO ₂ sem fer í niðurdælingu.	$\Delta\%L_{CO_2/N} = \sqrt{\frac{\sum_{r=0}^{r_{max}} \left(r_i \cdot C_{CO_2/Ni} \cdot Q_N \sqrt{(\Delta\%C_{CO_2/Ni})^2 + (\Delta\%Q_N)^2 + (\Delta\%r_i)^2} \right)^2}{(L_{CO_2/N})^2}}$

4.6 Óvissulíkan

Óvissulíkan var gert í Excel þar sem raunveruleg mæligildi úr hverjum hluta voru notuð til þess að reikna óvissuna með þeim jöfnum sem komið hafa fram í þessari skýrslu. Niðurstöður úr þessum reikningum má sjá í Töflu 10.

Tafla 10. Niðurstöður úr óvissulíkani, mikilvægar breytur og óvissur þeirra.

Breyta	Lýsing breytu	Óvissa frá líkani
C_{CO_2-gufa}	Styrkur CO ₂ úr efnagreiningu	2%*
Q_{Vx}	Gufufæði inn á vél x.	5%

$C_{CO_2/Vx}$	Styrkur CO ₂ í gufufláði inn á vél x.	1%
Q_{Lx}	Lásvatnsflæði út af vél x.	5%
$C_{CO_2/Lx}$	Styrkur CO ₂ í lásvatni út af vél x.	1%
Q_N	Flæði niðurdælingar.	5%
r_i	Hlutfall niðurdælingar með <i>i</i> þjöppur í gangi.	0%
$C_{CO_2/Ni}$	Styrkur CO ₂ í niðurdælingarvatni með <i>i</i> þjöppur í gangi.	1%
L_{CO_2}	CO ₂ losun.	4%

* Niðurstaða Urðar Dísar var sú að óvissa úr þessum hluta var 2,8% en þá var annað verklag við sýnatökurnar. Þessi verklagsbreyting virðist því hafa minnkað óvissuna í þessum hluta.

5 Niðurstöður

Niðurstaða þessarar rannsóknar er sú að óvissa á CO₂ losun frá Hellsheiðarvirkjun er um 4% eða sem svarar um 1000 tonnum af CO₂. Réttara væri því að birta losunina sem 24.000 (±1000) tonn frekar en 23.555 tonn. Ekki er tekið tillit til ýmissa þátta þegar losunin og/eða óvissa hennar er reiknuð og athugasemdir og tillögur að lagfæringum á ferlinu má sjá hér að neðan.

5.1 Athugasemdir og tillögur að lagfæringum

- 1) Ekki er tekið tillit til óvissu vegna framkvæmdar á sýnatöku en þar eru margir þættir sem geta spillt fyrir sýnatökunni. Ef búnaðurinn er til dæmis ekki nægilega þéttur getur hluti gassins flætt meðfram stútum í stað þess að fara ofan í flöskuna eða súrefni komist í sýnið. Þessir þættir og fleiri ófyrirsjáanlegir geta aukið óvissuna töluvert.
- 2) Reikniskjal frá rannsóknarstofu notar eðlismassa KOH lausnarinnar á tveimur stöðum í úrvinnslu og þeim ber ekki saman. Prófað var að mæla eðlismassann inni á tilraunastofu; 100 ml mæliflaska fyllt upp að striki og vegin og reyndist eðlismassinn vera 1,367±0,1% við 22,6°C. Þetta var endurtekið við nýja blöndun, þá fékkst 1,368±0,1%, sem skarast við fyrri mælingu. Þetta bendir til þess að massaprósenta KOH lausnarinnar sé í raun 44% og eðlismassinn sem notaður er sé ekki réttur.
- 3) Gert er ráð fyrir því að styrkur CO₂ uppleyst í KOH lausninni áður en sýnataka fer fram sé alltaf sá sami. Ný KOH lausn er blönduð reglulega og því væri æskilegt að títra hana þegar það er gert svo styrkur CO₂ í KOH lausninni sé sem réttastur og skapi ekki óþarfa óvissu. Ef lausnin er orðin gömul er líka möguleiki á því að eitthvað af koltvíoxíðinu sleppi út í andrúmsloftið og því getur styrkurinn einnig breyst með tímanum.

4) Massi gufu í sýni er reiknaður sem:

$$\begin{aligned} m_{vg} &= m_{f/s} - m_f - V_{KOH}\rho_{2/KOH} = m_{f/s} - m_f - \frac{\rho_{2/KOH}}{\rho_{1/KOH}}(m_{f/KOH} - m_f) \\ &= m_{f/s} - \frac{\rho_{2/KOH}}{\rho_{1/KOH}}m_{f/KOH} - \left(1 - \frac{\rho_{2/KOH}}{\rho_{1/KOH}}\right)m_f \end{aligned}$$

Ef þetta væri rétt reikniaðferð, þá er óvissa m_{vg} :

$$\begin{aligned} \Delta m_{vg} &= \sqrt{(\Delta m_{f/s})^2 + (\Delta m_f)^2 \rho_{2/KOH} V_{KOH} \sqrt{(\Delta \% \rho_{2/KOH})^2 + (\Delta \% V_{KOH})^2}} \\ \Delta \% m_{vg} &= \frac{1}{m_{vg}} \sqrt{(\Delta m_{f/s})^2 + (\Delta m_f)^2 \rho_{2/KOH} V_{KOH} \sqrt{(\Delta \% \rho_{2/KOH})^2 + (\Delta \% V_{KOH})^2}} \end{aligned}$$

Þar sem $\rho_1 \neq \rho_2$ veldur þessi reikniaðferð skökku gildi, þar sem c.a. 98% af massa flösku með KOH og 2% af massa tómrar flösku er dregið frá massa flösku eftir sýnatöku.

Ef við gerum hinsvegar ráð fyrir að við getum einfaldlega vigtað magn gufu sem var tekin inn í flöskuna:

$$m_{vg} = m_{f/s} - m_{f/KOH}$$

Þá er óvissa m_{vg} samantöld óvissa vegna rangrar reikniaðferðar, sem hverfur ef ekki væri notast við tvo mismunandi eðlismassa fyrir KOH lausnina, og mældra þyngda:

$$\begin{aligned} \Delta \% m_{vg} &= \sqrt{\left(\frac{\left(m_{f/s} - \frac{\rho_{2/KOH}}{\rho_{1/KOH}}m_{f/KOH} - \left(1 - \frac{\rho_{2/KOH}}{\rho_{1/KOH}}\right)m_f\right) - (m_{f/s} - m_{f/KOH})}{m_{f/s} - m_{f/KOH}}\right)^2 + \frac{(\Delta m_{f/s})^2 + (\Delta m_{f/KOH})^2}{(m_{f/s} - m_{f/KOH})^2}} \\ \Delta \% m_{vg} &= \sqrt{\left(\frac{\left(1 - \frac{\rho_{2/KOH}}{\rho_{1/KOH}}\right)(m_f - m_{f/KOH})}{m_{f/s} - m_{f/KOH}}\right)^2 + \frac{(\Delta m_{f/s})^2 + (\Delta m_{f/KOH})^2}{(m_{f/s} - m_{f/KOH})^2}} \end{aligned}$$

5) Þegar hlutfall KOH í sýni er reiknað er það gert með þessari jöfnu,

$$r_{KOH} = \frac{V_{KOH}}{m_{vg} + V_{KOH}}$$

Þetta virðist eiga að vera rúmmálshlutfall, annars væri líklega búið að bæta eðlismassa KOH inni þetta, sem þýðir að þá er verið að nálgast eðlismassa sýnisins sem **1 g/ml**. Það felur í sér 0,2-0,3% skekkju ef miðað er við eðlismassa hreins vatns við 20-25°C. Uppleyst gös auka hinsvegar eðlismassa sýnis. Því er KOH-vatnslausn ekki kjörlausn (5 ml af KOH lausn + 10 ml af vatni < 15 ml lausn).

6) Ekki er tekið tillit til rafskautanna í títruninni, en þau gefa til kynna hvenær títratorinn eigi að hætta að títra og hafa í raun töluverð áhrif á títrunina. Einnig getur CO₂ losað út andrúmsloft úr sýninu þegar styrkur CO₂ í sýni er hár.

6 Heimildir

- Bostock, M. (2018). *Sankey Diagrams*. Sótt frá Mike Bostock: <https://bost.ocks.org/mike/sankey/>
- HoneyWell. (2018). *HoneyWell*. Sótt frá <https://shop-lab-honeywell.com/>
- Metrohm. (2018). *Metrohm Products*. Sótt frá <https://www.metrohm.com/en-us/products-overview/titration/titrando/29050020>
- Orkuveita Reykjavíkur. (2015). *Rekstrarbók Þróunar. Leiðbeiningar, Efnagreining á CO₂ H₂S með títrator*. Reykjavík.
- Orkuveita Reykjavíkur. (2018). *Ársskýrsla Orkuveitu Reykjavíkur 2017, Losun gróðurhúsalofttegunda samstæðu OR 2015-2017*. Reykjavík.
- Scuro, S. R. (2004). *Introduction to Error Theory*. Texas A&M University.
- U.S. Department of Commerce. (2017). *NIST, Carbon Dioxide*. Sótt frá NIST: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C124389>

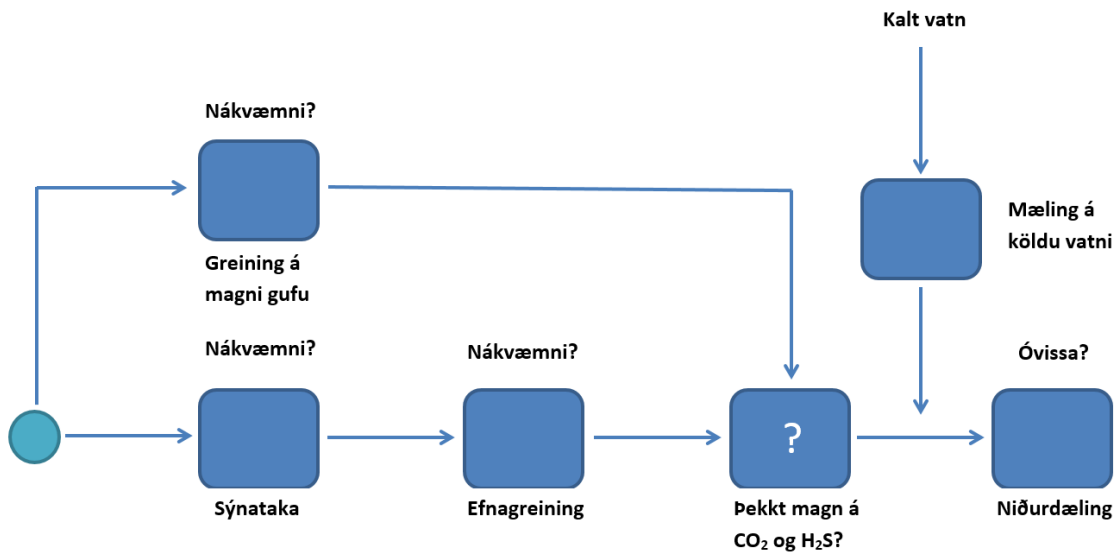


Óvissugreining

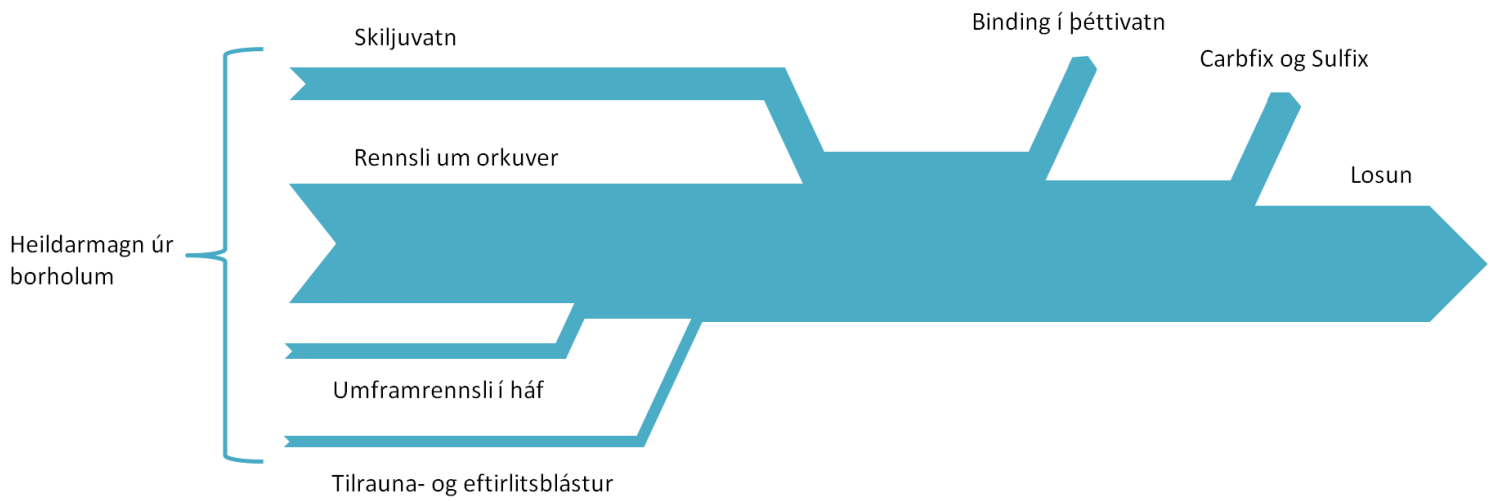
Mat á óvissu á losun gróðurhúsalofttegunda
frá virkjunum Orkuveitu Reykjavíkur

Höfundur: Urður Dís Árnadóttir

Óvissugreining á losun CO₂ og H₂S



Sankey-rit fyrir losun



Sýnataka

Framkvæmd:

Taka á sýni fjórum sinnum á ári og í hvert skipti tvær sýnatökufloksur úr hverri vél. Á Nesjavöllum eru sýni tekin úr vélum 1 og 2 saman, og úr vélum 3 og 4 saman. Á Hellisheiði er sýni tekið úr hverri vél, en þar eru sjö vélar; 1-6 og lágþrýstivél 11.

Þegar magn gróðurhúsalofttegunda frá virkjununum er reiknað þá er meðaltal tekið af sýnunum frá vélunum og það svo skalað út frá gufumagninu sem fer um alla virkjunina. Bergur er að skoða það að reikna losun hverrar vélar fyrir sig til að fá nákvæmara gildi á útblæstrinum.

Ekki er hægt að gera ráð fyrir að gufan í hvorri virkjun á hverjum tíma sé nokkurn veginn einsleit.

Gufan úr borholunum kemur saman í stamma áður en hún fer á vélarnar. Blöndunin í stammanum virðist hinsvegar ekki vera svo mikil og þess vegna er gufan ekki einsleit. Best er þess vegna að skoða hverja vél fyrir sig þegar reikna á óvissuna í gasmagninu sem losað er út í andrúmsloftið, þ.e. skoða gufusýnin úr hverri vél og skala þau út frá magninu af gufu sem fer um þá vél.

Þá fást í heildina 8 sýni úr hverri vél yfir árið og þá hægt að taka meðaltal af þeim mælingum til að fá lokatölu fyrir vélina. Þá þyrfti að fá tölur yfir gufumagnið sem fer um hverja vél á hverju ári. Auðvitað fara vélarnar stundum í viðgerð og einhverjar holur í blástur, en þessi aðferð er eins nákvæm og þetta verður eins og stendur.

Athuga þarf að mælingar hafa ekki alltaf farið fram fjórum sinnum á ári, þó svo að það eigi að gera samkvæmt leiðbeiningum. Gögnum mælinganna er skipt í möppur eftir árum og þarf þá að athuga í hverri möppu hversu oft hefur verið mælt á hverju ári.

Mælifloksurnar eru „skolaðar“ að innan með gufu, og þær hitaðar upp. Síðan eru þær kældar þannig að þrýstingur fellur og svo gott sem lofttæmi er að finna inni í þeim. Þá eru 5/10 ml af KOH (10 ml eru settir í stærri floksurnar, 250 ml floksurnar) basa settir í floksurnar og sýni svo tekið af gufunni í vélinni.

Niðurstöður:

Hugsanlegur óvissuþáttur í þessum hluta er magn á KOH basa sem sett er í floksurnar áður en sýnið er tekið frá virkjununum. Basinn er í sprautufloksum og erfitt getur verið að setja nákvæmt magn í floksurnar/túburnar. Þessi þáttur virðist ekki skipta mjög miklu máli fyrir títratorinn í efnagreiningunni, 1 ml skekkja í basanaum leiðir til 1% skekkju ef tekið er 100 ml gufusýni, en þessi stærð er þó mikið notuð í útreikningum til þess að fá hlutfall CO₂ eða H₂S í gufusýnunum.

Hægt er að lofttæma floksurnar og setja basann í þær á tilraunastofu og taka þær þannig upp í virkjun, en þá má lítið út af bregða því floksurnar eru ónothæfar ef ekki er lofttæmi í þeim þegar sýnið er tekið. Þetta gefur hins vegar mun nákvæmara gildi á magni af basa í floksunum áður en sýnið er tekið í þær.

Nú virðist eiga að taka upp nýtt kerfi með nýjum sýnatökufloeskum sem verða þá undirbúnar á tilraunastofunni og teknar tilbúnar í sýnatökuna. Þá má áætla að óvissan á þessum þætti verði mun lægri.

Efnagreining

Framkvæmd:

Tvær túbur koma fyrir hvert sýni og hver túba er greind tvisvar sinnum. Ef mismunur milli greininga í sömu túbu er meiri en 5% þá er títrað í þriðja skiptið – eða þar til munurinn er nægilega lítill, þ.e. minni en 5%. Ef munurinn er meiri eða ef súrefni kemst í túbuna, þá er sú mæling ekki tekin með.

Í túpunum er bæði gas og vökvi (þétt gufa). Hluti af sýninu er þá tekinn úr túbunni og settur í lítið tilraunaglas. Þá eru 2 ml teknir úr floeskunni með 1 ml pípettu, einn ml í einu, og settir í bikarglas. Hér er líklegast einhver óvissa (athuga þarf hver óvissa pípettunnar er). 18,2 Ω afjónað vatn er svo sett út í bikarglasið, þar til heildarvökvinn er u.þ.b. 50ml – óvissa í magni á afjónuðu vatni hefur ekki áhrif á niðurstöður.

Nú þarf að títra sýnið með tveimur mismunandi aðferðum til þess að mæla CO₂ og H₂S í sýninu. Títrunin er framkvæmd með 905 Titrandó titrator frá Metrohm og skammtaflöskum frá sama fyrirtæki.

Tækið títrar fyrst H₂S með 0,02 M AgNO₃ lausn og við það hvarfast silfrið við brennisteininn og myndar Ag₂S_(s) sem litar lausnina brúnsvarta (2Ag⁺ + S²⁻ --> Ag₂S_(s)). Silfurskaut er notað við títrunina. Endapunkturinn er þegar sama magn er af AgNO₃ og S, eða þegar allur brennisteinninn er horfinn úr sýninu. Þá fellur spennan niður. Út frá þessari títrun fást upplýsingar um magnið af H₂S sem var í lausninni.

Svo títrar tækið CO₂ með 0,1 M HCl lausn frá pH 8,3 niður í pH 4,5. Tækið fer í raun niður fyrir pH 4,5 til þess að losa alveg allt magn af CO₂ úr sýninu, þ.e. til þess að finna endapunktinn þar sem það gerist. Með þessu fæst mat á hversu mikið var af CO₂ í sýninu. Magnið af sýru með þekktan styrk (hér 0,1 M HCl) sem þarf til að breyta sýrustigi lausnarinnar frá 8,3 - þar sem næstum allt uppleyst CO₂ kemur fyrir sem HCO₃⁻, niður í 4,5 - þar sem það kemur allt fyrir í H₂CO₃ gefur til kynna hversu mikið er af uppleystu CO₂ í lausninni.

Þegar búið er að títra með saltsýrunni (HCl), þá er sýnið afgasað með argoni í ca. 5 mín til þess að losa allt CO₂. Svo er sýnið baktítrað frá pH 4,5 upp í 8,3 með 0,1 M NaOH basa til að ákvarða magn þeirra efna fyrir utan CO₂ sem hvarfast við sýruna. Það er svo dregið frá magninu af CO₂ sem fékkst upphaflega úr fyrri títruninni.

Þessi efni sem einnig hvarfast við sýruna (s.s. fyrir utan CO₂) eru t.d. súlfíð, kísill, bór, ál og járn; lífrænar sýrur og basar.

Ef súrefni hefur komist í sýnið þá hvarfast það við brennisteinsvetnið og myndar H₂SO₄. Þess vegna mælist minna magn af H₂S í sýnum þar sem loftmengun hefur átt sér stað, en þau gildi eru ekki skráð í gagnagrunn.

pH-mælir sér um CO₂ títrunina. Mælirinn er staðlaður með þremur stöðlum: 4, 7 og 10 pH. Nákvæmnin er u.þ.b. 0,02 pH ef mælirinn er kvarðaður við rétt hitastig.

Athugasemd: Er mikil óvissa á styrknum á sýrunni og basanum sem notað er við títrunina? Og skiptir það máli fyrir óvissuna á lokaniðurstöðunni frá tækinu?

Svar: Skv. Ingva líklegast innan við 2%. Lausnin er útbúin úr ambúllum með fyrirfram ákveðnu magni af sýru eða basa.

Niðurstöður:

Þegar efnagreiningu lýkur þá gefur tækið upp hlutfallið af CO₂ og H₂S sem var í sýninu í einingunni mg/ml. Þessar tölur eru svo skráðar inn í Excel-skjal ásamt magninu af basa sem notað var við sýnatökuna (þynning).

Í skjalinu er svo magn af H₂S og CO₂ í hverju kg af gufu reiknað. Sjá má brot úr því á mynd 1.

Hlutfall KOH í sýninu (basinn sem sprautað er í túburnar við sýnatöku) er að finna í skjalinu, ásamt leiðréttingargildi fyrir það magn CO₂ sem er í basanum sem sprautað var inn í túbuna. Lokatalan fyrir magn á CO₂, í mg á hvert kg af gufu, fæst með því að draga þetta leiðréttingargildi frá magninu af CO₂ sem títratorinn gefur upp. Því næst er sú tala margfölduð við leiðréttingargildi vegna þynningar þegar basinn var settur í túbuna í upphafi.

CO₂ mæling:

Sýni nr.	Túpa nr.	CO ₂ í KOH mg/l	Hlutfall KOH í sýni	CO ₂ Leiðr. mg/l	CO ₂ (lútur) mg/l	Þynning v. basa	CO ₂ Gufa mg/kg
0,00	119,00	660	0,057	37,3	1408,0	1,060	1452,8
0,00	119,00	660	0,057	37,3	1476,2	1,060	1525,1
0,00	135,00	660	0,054	35,9	1410,2	1,058	1453,4
0,00	135,00	660	0,054	35,9	1401,4	1,058	1444,1

Mynd 1. Tafla með gildum og útreikningum sem notuð eru til að finna magn CO₂ í hverju kg gufu

Óvissa á hlutfalli magns CO₂ og gufu í gufusýnum

Tilraun var gerð til þess að reikna óvissuna á magni CO₂ í mg í hverju kg af gufu. Þetta hjálpar til með að sjá hvaða þættir með óvissu koma inn í lokatöluna fyrir magnið á CO₂ og hvernig óvissan á henni er reiknuð.

Í töflu 1 má sjá þær breytur sem koma við sögu, en þær má finna í Excel-skjöllum fyrir gufusýni úr vélum virkjananna.

Tafla 1. Breytur sem koma við sögu í útreikningum á magni CO₂ í gufu virkjana

Nafn breytu	Bókstafur
CO ₂ í basanum KOH	a
Magn KOH sett í sýni	b
Hlutfall KOH í sýni	c
Vatnsgufa í sýni	d
CO ₂ leiðrétting	e
CO ₂ lútur frá títrator	f
Þynning vegna basa	g
CO ₂ í gufu, mg/kg	h
Tóm túba, þyngd	m ₁
Þyngd túbu + sýni	m ₂

Við höfum eftirfarandi sambönd:

$$c = \frac{b}{b + d}$$

$$e = a \cdot c$$

$$g = \frac{b + d}{d}$$

$$d = (m_2 - m_1) - (1,373 \cdot b)$$

$$h = (f - e) \cdot g$$

Svo rita má:

$$h = (f - e) \cdot g \rightarrow h = (f - e) \cdot \left(\frac{b + d}{d}\right) \rightarrow h = \left(f - \frac{a \cdot b}{b + d}\right) \cdot \left(\frac{b + d}{d}\right)$$

Hægt er svo að einfalda formúluna á eftirfarandi hátt:

$$h = A \cdot B, \quad \text{þar sem } A = \left(\frac{b + d}{d}\right) \text{ og } B = \left(f - \frac{a \cdot b}{b + d}\right)$$

Óvissur þeirra breyta sem reikna þarf með til að finna h, eða magn CO₂ í hverju kg af gufu, er að finna í töflu 2. Athugum að a er fasti.

Tafla 2. Formúlur fyrir óvissur breytanna

Tákn	Formúla
Δb	Δb
Δm_1	Δm_1
Δm_2	Δm_2
Δd	$\sqrt{(\Delta m_2)^2 + (\Delta m_1)^2 + (1,373 \cdot \Delta b)^2}$
$\Delta(b+d)$	$\sqrt{(\Delta b)^2 + (\Delta d)^2}$
$\Delta c = \Delta(b/b+d)$	$c \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta(b+d)}{b+d}\right)^2} = c \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \frac{(\Delta b)^2 + (\Delta d)^2}{(b+d)^2}}$
$\Delta(ab/b+d)$	$\left(\frac{a \cdot b}{b+d}\right) \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \frac{(\Delta b)^2 + (\Delta d)^2}{(b+d)^2}}$
$\Delta A = \Delta g = \Delta(b+d/d)$	$\left(\frac{b+d}{d}\right) \cdot \sqrt{\frac{(\Delta b)^2 + (\Delta d)^2}{(b+d)^2} + \frac{(\Delta d)^2}{(d)^2}}$
$\Delta B = \Delta(f - ab/b+d)$	$\sqrt{(\Delta f)^2 + \left(\frac{a \cdot b}{b+d}\right)^2 \cdot \left(\left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \frac{(\Delta b)^2 + (\Delta d)^2}{(b+d)^2}\right)}$
Δh	$h \cdot \sqrt{\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta B}{B}\right)^2}$

Þegar reikningar voru framkvæmdir var ekki litið á d sem grunnstærð þar sem hún er fall af öðrum breytistærðum, en til einföldunar er d og Δd ritað í formúlum.

Dæmi um óvissuútreikninga:

Dæmi 1

Ef við höfum að $a = 660$ mg/l, $b = 5$ ml, $m_1 = 226,97$ g, $m_2 = 317,31$ g og $f = 1408,0$ mg/l.

Og við segjum t.d. að gróflega áætlað hafi grunnstærðirnar eftirfarandi óvissur: $\Delta b = 0,2$ ml, $\Delta m_1 = \Delta m_2 = 0,1$ g og $\Delta f = 5$ mg/l.

Þá fæst með reikniforriti að $\Delta d = 0,3089$, $\Delta A = 0,0059$ og $\Delta B = 5,2202$. Þannig að $\Delta h = 9,799$ mg/kg. Þ.e. að magn CO₂ í gufu er $1452,8 \pm 9,8$ mg/kg. Hlutfallsóvissan er 0,0067 eða 0,67 %.

Dæmi 2

Við nánari athugun kom í ljós að hægt var að bæta mat á óvissum grunnstærðanna töluvert. Með auknum upplýsingum um mælitæki fékkst sú niðurstaða að vigtin sem notuð er til að finna massa túbanna hefur nákvæmni upp á 0,01 g, og því er $\Delta m_1 = \Delta m_2 = 0,01$ g en ekki 0,1 g.

Sprautan sem notuð er til þess að setja basann (KOH) í sýnatökuflöskurnar var athuguð nánar og kom í ljós að þar mátti gera ráð fyrir um 1 ml óvissu, sem er töluvert meira en 0,2 ml. Þannig að $\Delta b = 1$ ml. Þó ber að hafa í huga að verið er að taka í notkun nýjar sýnatökufloeskur og mun basinn (KOH) vera settur í þær á tilraunastofu áður en haldið er í sýnatöku. Því má gera ráð fyrir talsvert meiri nákvæmni í þessum lið þegar fram líða stundir.

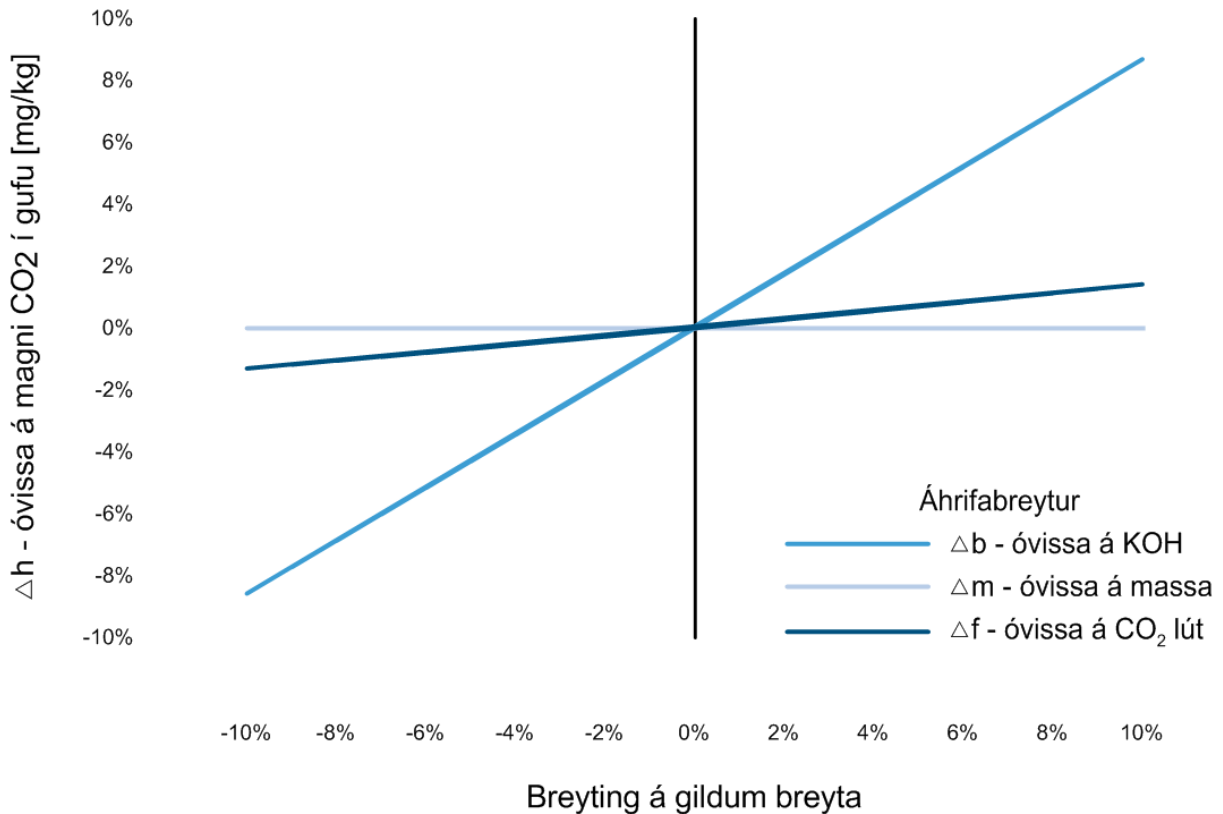
Í dæmi 1 var áætluð óvissa á CO₂ lút frá títrator 5 mg/l, en það eru einungis 0,36 %. Því var ákveðið að réttara væri að áætla að óvissan væri um 1% þ.a. $\Delta f = 14,08$ mg/l. Þetta þyrfti þó að skoða nánar.

Þá fæst með reikniforriti að $\Delta d = 1,3731$, $\Delta A = 0,026796$ og $\Delta B = 15,950$. Þannig að $\Delta h = 40,433$ mg/kg. Þ.e. að magn CO₂ í gufu er $1452,8 \pm 40,4$ mg/kg. Hlutfallsóvissan er 0,0278 eða 2,8 %. Óvissan hér er því fjórfalt meiri en áætlað var í upphafi.

Næmnigreining fyrir dæmi 2

Gerð var næmnigreining út frá gildunum í dæmi 2. Athuguð voru áhrif þess að auka óvissuna á b – magn KOH sem sett er út í sýnið, m – massi túbanna með og án sýnis (sama óvissa á m₁ og m₂) og f – CO₂ lútur frá títrator. Sem sagt þá er skoðað hversu mikið Δh eykst eða minnkar þegar óvissur þessara þriggja áhrifabreyta aukast eða minnka. Þetta má sjá á mynd 2. Óvissa massans er það lítil að breyting á henni hefur engin áhrif á Δh . Óvissan á CO₂ lút frá títrator hefur einhver áhrif – athuga má að hún er sem stendur metin sem einungis 1% og gætu áhrif hennar því aukist ef hún reynist vera hærri. Langmest áhrif hefur breyting á óvissu magnsins af KOH sem sett er í sýnatökufloeskurnar og er fylgnin línuleg. Óvissan er auðvitað talsvert há eða um 20%, og kemur margoft inn í formúluna fyrir Δh .

Breyting á Δh sem fall af breytingu á gildum breyta



Mynd 2. Næmnigreining fyrir óvissu á magni CO₂ í hverju kg gufu.

Greining á magni gufu – upplýsingar úr Vinnuskýrsla Gufuholur, Nesjavellir/Hellisheiði 2015. Einar Gunnlaugsson.

Á virkjunarstöðum losnar gas úr gufu á þrennan hátt út í andrúmsloftið:

Í eimsvölum í stöðvarhúsi

Í umframgufu í háfa við skiljustöð

Í hljóðdeyfum við prófanir á holum

Losunin er að jafnaði mest við stöðvarhús í eimsvölum. Það fer þó eftir því hversu mikið er um boranir og prófanir á borholum – hversu mikið fer um hljóðdeyfa.

Losun á gasi er annars vegar reiknuð út frá mældum styrk í gasi og þéttivatni, og hins vegar út frá mældu eða reiknuðu rennsli vatns og/eða þéttvatns.

Framkvæmd:

Losun í eimsvölum

Gufa frá hverflum virkjunarinnar er þétt í eimsvölum. Styrkur ýmissa gastegunda er hár í gufunni og því leysist aðeins lítil hluti þeirra upp í vatninu sem myndast við þéttingu gufunnar (þéttivatn). Gastegundirnar mynda því gasfasa sem er sogaður út úr eimsvölunum með lofttæmisdælum, og gasið losað út í andrúmsloftið um háfa eða kæliturna. Helstu gastegundirnar í gasfasanum eru CO₂, H₂S, H₂ og CH₄. Styrkur gastegundanna í gufunni er breytilegur eftir vinnsluvæðum, en mest er þó af CO₂ og síðan H₂S.

Með því að mæla gufurennslu í virkjunum má reikna heildarmagn þeirra gastegunda sem losaðar eru. Rennslu gufu um hverfla og eimsvala er mælt með hljóðhraðarennslismælum í afrennsli frá hverjum eimsvala, og er það skráð í gagnagrunn kerfiráðs. Rúmmál gufu á hverri sekúndu er mælt í einingunni l/s en það er svo umreiknað yfir í massa á sekúndu í einingunni kg/s út frá hitastigi þéttivatnsins sem einnig er mælt og skráð.

Hversu oft er þetta mælt? Og er tekið fram hvaða holur eru í notkun þegar mælingarnar eru gerðar?

Losun í háfa við skiljustöð

Við stjórnun á þrýstingi gufunnar í virkjuninni þarf að losa dálítið af gufu í útblástursháfa um stjórnloka við hálokahús eða skiljustöð. Stefnt er markvisst að því að halda þessari gufu í lágmarki. Erfitt hefur þó reynst að mæla rennsli gufunnar sem fer þessa leið og er því notast við opnun á stjórnlokum, þar sem samband þrýstings, rennslis og opunar er þekkt – kennilína.

Losun í hljóðdeyfum

Þegar holur eru látnar blása fer rennsli úr holum í hljóðdeyfa. Þá er fylgst með rennsli og vermi með þekktum aðferðum. Skráð er í DMM hvenær hola fer í blástur og hvenær blæstri í hljóðdeyfi lýkur. Úrvinnsla í DMM reiknar út þann tíma sem holur eru í blæstri ásamt heildarrennsli. Út frá aflmælingum er hægt að reikna heildarmagn af gufu sem sleppt er út í andrúmsloftið.

Losun gastegunda frá Helliheiðarvirkjun 2015

		Rennsli um orkuver	Umframrennsli í háf	Tilrauna og eftirlitsblástur	Heildarrennsli	Bundið í þéttivatni	Heildarmagn	Gas dælt niður í SulFix verkefninu	Gaslosun í andúmsloft
Gufa	(Tonn/ári)	13.720.342	137.203	45.613	13.903.159				
Skiljuvatn	(Tonn/ári)	20.043.924	0	80.717	20.124.641				
Heildarrennsli	(Tonn/ári)	33.764.266	137.203	126.330	34.027.799				
Meðalstyrkur CO2 í gufu	(mg/kg)	2792	2792	3767					
Meðalstyrkur H2S í gufu	(mg/kg)	701	701	654					
Meðalstyrkur H2 í gufu	(mg/kg)	27,8	27,8	22,7					
Meðalstyrkur CH4 í gufu	(mg/kg)	5,71	5,71	10,00					
Heildarmagn CO2	(tonn/ári)	38.311	383	172	38.866	1878	36.988	3.911	33.077
Heildarmagn H2S	(tonn/ári)	9.616	96	30	9.742	1155	8.587	2.203	6.384
Heildarmagn H2	(tonn/ári)	381,6	3,8	1,0	386	0	386		386
Heildarmagn CH4	(tonn/ári)	78,36	0,78	0,46	80	0	80		80
Heildargas	(tonn/ári)	48.387	484	203	49.074	3.033	46.041	6.114	39.927

Heildarrennsli sem fer um virkjunina er skipt í þrennt:

Rennsli um orkuver

Umframrennsli í háf

Tilrauna og eftirlitsblástur

Aðeins er notast við gufuhluta rennslisins þegar magn gastegunda sem virkjunin losar er fundið, ekki skiljuvatn.

Sami meðalstyrkur gastegunda er í gufu sem fer um orkuver og gufu sem fer í umframrennsli í háfi.

Hins vegar er ekki sami meðalstyrkur gastegunda í gufu sem losuð er í tilrauna og eftirlitsblæstri. Nú þarf að komast að því hvernig þessi meðalstyrkur er fundinn út og hversu oft hann er mældur og þess háttar.

Til þess að finna heildarmagn gastegunda í útblæstri virkjana er magn gufu margfaldað með meðalstyrk gastegundanna í gufunni.

Þetta er gert fyrir þessa þrjá hluta; rennsli um orkuver, umframrennsli í háf og tilrauna – og eftirlitsblástur. Niðurstöðurnar eru svo lagðar saman þannig að heildarmagn helstu gastegunda fæst, ásamt heildarmagni gass sem losað er.

Í töflunni eru gefin upp gildi fyrir heildarmagn CO_2 og H_2S sem bundið er í þéttivatni. Athuga þarf hvernig þau eru fengin og hver nákvæmnin er á því. Þetta magn af CO_2 og H_2S er svo dregið frá heildarmagni gass sem losað er, og frá heildarmagni CO_2 og H_2S sem virkjun losar.

Að lokum er það gas sem dælt er niður í SulFix og CarbFix dregið frá heildarmagni gass sem losað er. Þar er um að ræða CO_2 og H_2S en magn H_2 og CH_4 breytist ekki. Einnig þarf að athuga hver nákvæmnin er þegar þessar tölur eru fengnar. Sýni eru tekin af gasmettuðu niðurdælingarvatni og flæði þess einnig mælt, þ.a. spurningin er hversu reglulega eru sýnin tekin og hvort fengið er þá eitthvert meðaltalsgildi fyrir gasmagnið í vatninu sem er svo notað til að reikna út hvert heildarmagnið er.

Þegar búið er að leggja saman og draga frá áður nefnd gildi er heildargaslosun í andrúmsloft loksins fengin.

Niðurstöður:

Niðurdæling

Framkvæmd:

Hluta af gasinu, þ.e. brennisteinsvetni og koldíoxíði er dælt aftur niður í jarðhitageyminn þar sem það binst sem steindir. Þetta magn er áætlað miðað við það rennsli sem fer í niðurdælinguna. Magn gastegundanna sem dælt er niður er svo dregið frá heildarlosun í andrúmsloft. Lofthreinsistöð var tekin í notkun við Hellisheiðarvirkjun árið 2014, en hún hreinsar brennisteinsvetni úr útblæstri virkjunarinnar. Í henni eru gasflæðimælar sem mæla gasflæðið að og frá stöðinni. Magn gass sem er dælt niður er mismunur þessara tveggja gilda. Vandræði hafa þó verið með gasflæðimælana vegna raka (á þetta enn við? – Hellisheiðarvirkjun: Niðurdæling jarðhitagass 2014) og því ekki hægt að notast við þá til að meta árangur hreinsunar brennisteinsvetnis úr útblæstri virkjunarinnar. Sýni eru reglulega tekin af gasmettuðu niðurdælingarvatni til efnagreininga á H_2S og CO_2 , og er flæði gasmettaða niðurdælingarvatnsins einnig mælt. Út frá þessum tveimur mælingum er hægt að reikna heildarmagn H_2S og CO_2 sem dælt var aftur ofan í jarðhitageyminn. Magn H_2S og CO_2 í niðurdælingarvatni er breytilegt á milli mælinga, en til þess að meta hversu mikið magn af lofttegundunum er dælt niður er meðaltal tekið af niðurstöðum mælinganna. Til þess að meta óvissu á niðurdælingu má því athuga staðalfrávik þessara styrkmælinga fyrir H_2S og CO_2 . (Sjá töflu 1 í skránni Hellisheiðarvirkjun – Niðurdæling jarðhitagass 2014)

CarbFix

Koltvísýringi frá Hellisheiðarvirkjun er dælt niður í dýpri grunnvatnsstrauma þar sem hann binst í formi karbónat steinda í berggrunninum. Koltvísýringurinn er fyrst leystur upp í vatni sem dregur úr

hættu á því að hann sleppi til yfirborðs áður en hann binst. Auk þess þá binst koltvísýringurinn hraðar í berginu ef hann er uppleystur í vatni.

Koltvísýringurinn er aðskilinn frá öðrum gastegundum í útblæstri og svo er hann uppleystur í vatni. Þar sem erfitt er að fylgjast með því hvað verður um koltvísýringinn þegar honum hefur verið dælt niður eru svokölluð „tracer“ efni sett út í blönduna. Efnin SF₆ og SF₅CF₃ eru sett út í til að fylgjast með hreyfingum niðurdælingarvökvans neðanjarðar. Litlu magni af geislavirku samsætunni C-14 er svo bætt við, þar sem allt kolefni í berggrunninum sem tekur við niðurdælingarvökvanum er það gamalt að það inniheldur engar geislavirkar kolefnissamsætur. Þannig að ef geislavirkt kolefni finnst í karbónati í berginu þá er það að öllum líkindum frá gasinu sem dælt var niður.

Þessar aðferðir gefa til kynna að meira en 95% af koltvísýringnum sem dælt var niður hafi binst sem karbónat í jarðlög innan tveggja ára.

SulFix

Brennisteinsvetni frá Hellisheiðarvirkjun er dælt niður í jarðhitakerfið þar sem það binst sem brennisteinskís (pýrít eða glópagull) eða skyldar steindir. Brennisteinsvetnið er einnig blandað vatni áður en því er dælt niður í berggrunninn.

https://www.or.is/sites/default/files/verkefnisaaetlun_sulfix_2.pdf