

Verkefnisáætlun SulFix

Um förgun brennisteinsvetnis frá jarðgufuvirkjunum

Stýrihópur skipaður fulltrúum Orkuveitu Reykjavíkur, Landsvirkjunar og HS Orku

20. febrúar 2013



ÁGRIP

Þann 9. maí 2012 gerðu þrjú íslensk orkufyrirtæki, sem nýta háhitasvæði til orkuframleiðslu, með sér samkomulag um að takast sameiginlega á við það verkefni að uppfylla kröfur reglugerðar 514/2010 um styrk brennisteinsvetnis í andrúmslofti. Þetta eru Orkuveita Reykjavíkur, Landsvirkjun og HS Orka og byggist hið sameiginlega verkefni á því þróunarstarfi sem þegar hefur verið unnið á vegum Orkuveitunnar.

Sameiginlegur stýrihópur fyrirtækjanna þriggja var settur á fót og varð hópnum strax ljóst að hagkvæm, árangursrík og umhverfisvæn lausn yrði ekki fullbúin þegar hert ákvæði reglugerðar 514/2010 taka gildi um mitt ár 2014. Því sendi stýrihópurinn umhverfisráðherra (nú umhverfis- og auðlindaráðherra) erindi þar sem þess var farið á leit að gildistöku herta ákvæða yrði frestað. Var í erindinu fyrirhuguðu samstarfi lýst og í samskiptum fyrirtækjanna og stjórnvalda síðan var kallað eftir ýtarlegri verkefnisáætlun orkufyrirtækjanna. Sú áætlun fer hér á eftir.

SulFix er samheiti nokkurra tengdra verkefna, sem unnið hefur verið að við Hellisheiðarvirkjun frá árinu 2007 og miða að því að farga brennisteinsvetni frá virkjuninni með hagkvæmum, árangursríkum og umhverfisvænum hætti. Nafnið, sem varð til árið 2010, er dregið af heiti sambærilegs alþjóðlegs vísindaverkefnis – CarbFix – sem hófst við Hellisheiðarvirkjun árið 2007. Markmið CarbFix, sem enn stendur yfir, er að þróa aðferð til að binda koltvísýring frá virkjuninni á föstu formi djúpt í jarðlögum í grennd við virkjunina. Vísindalegar uppgötvanir og þróun búnaðar fyrir CarbFix verkefnið hafa nýst beint til förgunar brennisteinsvetnis og því hlaut brennisteinsverkefnið heitið SulFix.

Áætlunin lýsir forsögu verkefnisins og núverandi stöðu þróunarstarfsins, þar sem þegar hefur tekist að dæla brennisteinsvetni niður í jarðlög í tilraunaskyni. Þá er skipulag þess rakið. Af samstarfsaðilunum þremur liggur Orkuveitu Reykjavíkur mest á að farsæl lausn finnist og tekur skipulag verkefnisins mið af því. Meginmarkmið SulFix verkefnisins er rakið og þau undirmarkmið, sem fyrirtækin vinna sameiginlega að. Meginmarkmiðið er að að þróa varanlega, hagkvæma lausn svo að styrkur brennisteinsvetnis í andrúmslofti frá jarðvarmavirkjunum sé í samræmi við reglugerðir hverju sinni, þ.m.t. reglugerð nr. 514/2010. Lausnin verði prófuð og sýnt fram á virkni hennar í rekstri Hellisheiðarvirkjunar.

Framkvæmdaröð og framkvæmdaaðferðir eru raktar sem og aðföng verkefnisins, þar á meðal þeir fjármunir sem til þess eru ætlaðir. Til þessa hefur Orkuveitan varið um 450 m.kr í rannsóknir og tilraunarverkefni sem tengjast SulFix jarðvarma gösum á Hellisheiði, auk 315 m.kr. framlag til CarbFix kolefnisbindingarverkefnis. Áætlað er að stofnkostnaðurinn fyrir fullnaðarlausn (SulFix niðurdæling) til hreinsunar brennisteinsvetnis í Hellisheiðarvirkjun muni kosta um það bil 1.200 m.kr. Meðan stofnkostnaður þekktra iðnaðarlausna er áætlaður 5.500 m.kr.

Þessi verkefnisáætlun var staðfest á fundi stýrihóps Orkuveitu Reykjavíkur, Landsvirkjunar og HS Orku þann 18. febrúar 2013. Stýrihópurinn skipa Bjarni Bjarnason frá Orkuveitu Reykjavíkur, Óli Grétar Blöndal Sveinsson frá Landsvirkjun og Þór Gíslason frá HS Orku.

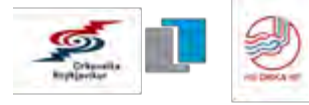
Undirritaður veitir allar nánari upplýsingar um áætlunina og svarar fyrirspurnum um hana.

Bjarni Már Júlíusson, verkefnisstjóri; MPM



EFNISYFIRLIT

| | |
|---|----|
| Ágrip | i |
| 1 Bakgrunnur verkefnisins | 1 |
| 1.1 CarbFix-verkefnið og samlegð við SulFix verkefnið | 1 |
| 1.2 Brennisteinsvetni í mati á umhverfisáhrifum | 2 |
| 2 Fyrsta áfanga SulFix lokið | 2 |
| 3 Reglugerð 514/2010 | 3 |
| 3.1.1 Viðmiðunarmörk í reglugerð nr. 514/2010 | 3 |
| 3.2 Heilsufarsáhrif | 4 |
| 3.3 Loftgæðamælingar | 5 |
| 3.4 Samstarf jarðorkufyrirtækja | 6 |
| 4 Markmið verkefnisins | 6 |
| 4.1 Meginmarkmið | 6 |
| 4.1.1 Undirmarkmið 1 | 6 |
| 4.1.2 Undirmarkmið 2 | 6 |
| 4.1.3 Undirmarkmið 3 | 6 |
| 5 Framkvæmdin – SulFix og aðrar mögulegar lausnir | 6 |
| 6 Verkefnisgreiningar | 10 |
| 7 Aðföng og fjármál | 10 |
| 8 Meginrás verkefnisins | 11 |
| 8.1 Áfangaskipting | 12 |
| 8.2 Vörður | 14 |
| 8.3 TÍMAÁÆTLUN | 16 |
| 9 Stjórnskipulag | 17 |
| 10 Samskipti og samskiptaleiðir | 18 |
| 10.1 Umræða síðustu ár | 18 |
| 10.2 Hagsmunaaðilar | 18 |
| 10.3 Samskiptaleiðir | 21 |
| 11 Lokaorð | 21 |
| 12 Heimildir | 23 |



1 BAKGRUNNUR VERKEFNISINS

Útstreymi brennisteinsvetnis frá virkjunum Orkuveitu Reykjavíkur á Hengilssvæðinu er stærsta umhverfismál sem fyrirtækið glímir nú við í rekstri sínum. Útstreymi brennisteinsvetnis (H_2S) frá Nesjavallavirkjun og Hellisheiðarvirkjun var samtals rúmlega 28.000 tonn árið 2012¹. Til að átta sig á umfanginu fyrir jarðhitageirann á Íslandi hefur verið tekið saman yfirlit um núverandi og fyrirhugað útstreymi jarðhitagasa.²

Lengi hefur verið til umræðu og skoðunar að draga úr styrk brennisteinsvetnis í gasi frá jarðvarmavirkjunum á Hengilssvæðinu. Á undirbúningstíma Nesjavallavirkjunar, um 1990, hófust þessar athuganir og var með reglubundnum hætti haldið áfram að skoða og kanna það sem verið var að gera annars staðar í heiminum á þessu sviði³. Þá þótti ekki vera tilefni til að ráðast í kostnaðarsamar aðgerðir þar sem litið var á H_2S í útblæstri sem óþægindi frekar en vandamál. Um 27 km eru milli Nesjavallavirkjunar og höfuðborgarsvæðisins og um 12 km til Hveragerðis. Um svipað leyti var gripið til aðgerða við Kröfluvirkjun Landsvirkjunar til að dreifa útblæstri brennisteinsvetnis frá virkjuninni með því að leiða hann í kæliturna. Markmið þeirrar aðgerðar var tvíþætt; að bæta vinnuumhverfi og draga úr tærandi áhrifum á rafbúnað.

Hellisheiðarvirkjun, sem tekin var í notkun 2006, er stærri og nokkru nær byggð á höfuðborgarsvæðinu (20 km) en Nesjavallavirkjun og landslag er opnara milli virkjunar og byggðar. Lyktarmengunar frá henni verður því frekar vart í byggð. Það gerist við ákveðin veðurskilyrði, einkum hægjar austlægar og norðaustlægar áttir, þegar kalt er í veðri. Fjarlægð frá virkjuninni í Hveragerði eru 11 km. Fljótlega eftir gangsetningu Hellisheiðarvirkjunar fór meira að bera á kröfum um hreinsun. Veigamikill áhrifaþáttur þess er að við gangsetningu virkjunarinnar var brennisteinsvetni ekki leitt út í kæliturna eins og nú er gert. Gufan frá kæliturnunum lyftir gasinu upp og tryggir meiri dreifingu útblástursins. Nú mælist styrkur brennisteinsvetnis í Reykjavík lægri en veturinn 2006-2007, þrátt fyrir að þá hafi orkuframleiðslan verið innan við þriðjungur þess sem hún er nú.

1.1 CARBFIX-VERKEFNIÐ OG SAMLEGÐ VIÐ SULFIX VERKEFNIÐ

Sú hugmynd að binda jarðhitagös sem steindir í jarðlögum með því að nýta þau efnaferli sem þegar eiga sér stað í berggrunninum, má segja að hafi styrkst með tilkomu CarbFix verkefnisins sem var hleypt af stokkunum haustið 2007. Fjöldi íslenskra og erlendra vísindamanna hefur komið að verkefninu ásamt ríflega tug doktorsnema sem hefur unnið eða er að vinna lokaverkefni sín í tengslum við verkefnið. Þá hafa tvær stúðinur varið meistaraaritgerðir um hluta CarbFix verkefnisins. Fjöldi ritrýndra fræðigreina sem tengjast verkefninu hefur verið birtur á síðustu misserum⁴.

CarbFix verkefnið er dæmi um samstarf íslensks fyrirtækis og háskóla beggja vegna Atlantshafsins. Samstarf af þessu tagi er mjög mikilvægt til að tilraunaverkefni eins og CarbFix geti þróast frá því að vera hugmynd yfir í raunverulegt verkefni. Verkbekking tækni- og vísindamanna Orkuveitu Reykjavíkur og Verkfræðistofunnar Mannvits hefur nýst verkefninu vel.

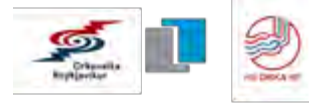
Prófanir hófust í mars 2011 en samfeld niðurdæling á CO_2 hófst í lok janúar 2012. Áður en hún hófst höfðu vísindar og tæknimenn unnið mikið við kenningasmíð, tilraunir á rannsóknastofum, líkanagerð, hönnun og smíði búnaðar. Ekkert hefur komið fram í þróun verkefnisins sem dregur úr þeirri tilgátu, sem lagt var upp með, að hægt væri að binda koltvísýring á föstu formi djúpt í jarðlögum. Þvert á móti hafa þær tilraunir og prófanir sem gerðar hafa verið stutt tilgátu verkefnisins. Aðferðafræði og allur tæknibúnaður hafa nýst vel vegna fyrirhugaðrar förgunar á H_2S frá

¹ Hólmfríður Sigurðardóttir (2013)

² Bjarni Már Júlíusson (2013)

³ VGK (2000)

⁴ CarbFix (2013)



Hellisheiðarvirkjun þrátt fyrir að H₂S förgun í stórum skala komi til með að eiga sér stað á meira dýpi en niðurdæling í CarbFix verkefninu. Ljóst er að Orkuveita Reykjavíkur var mun betur í stakk búin til að takast á við þann fjölda krefjandi verkefna og vandamála sem fylgja slíkri förgun vegna reynslu og tengsla úr CarbFix verkefninu.^{5 6}Nánar er fjallað um útfærslu SulFix verkefnisins í kafla 5.

1.2 BRENNISTEINSVETNI Í MATI Á UMHVERFISÁHRIFUM

Með aukinni almennri vitund og umræðu um loftgæðamál vegna jarðhitánýtingar var því lýst yfir í mati á umhverfisáhrifum fyrir Hverahlíðar- og Bitruvirkjanir árið 2008 að H₂S yrði hreinsað að 98% úr útblæstri virkjananna þrátt fyrir að reglugerð um styrk H₂S í andrúmslofti lægi ekki fyrir. Miðað við þáverandi tímasetningar á gangsetningu virkjananna var ljóst að ekki mætti dragast lengur með að koma tilraunum í gang. Vinna við undirbúning hófst árið 2007 og sama ár kom út skýrsla byggð á þeirri hugmynd að dæla einungis niður H₂S í jarðhitageyminn en ekki blöndu af H₂S og koltvísýringi (CO₂)⁷. Tilraunastöð til að meðhöndla jarðhitagas fyrir niðurdælingu var boðin út í maí 2008, viðauki sendur bjóðendum í júní og tilboð opnuð í júlí það ár. Samningur lá fyrir í ágúst með áætluð verklok í byrjun árs 2009.

OR tók ekki við tilraunastöðinni af verktaka fyrr en í lok mars 2010⁸. Fljótlega komu í ljós vandamál við tilraunareksturinn. Þau helstu eru tíunduð hér⁹:

- Breytingar voru á áspéttigufukerfi vélar 11 við Hellisheiðarvirkjun og gaslögn frá vél 11.
- Efnasamsetning á gasinu reyndist frábrugðin því gasi sem notað var til grundvallar hönnun. Gassamsetning var breytileg eftir því frá hvaða vélum gasið var tekið og mun meira vetni var í gasinu en gert hafði verið ráð fyrir.
- Talsvert súrefni reyndist vera í gasinu í gasskiljustöðinni og tók tíma að útiloka sprengihættu.
- Mikið var um útfellingar brennisteins á ýmsum stöðum og af ýmsum ástæðum.
- Frostvandamál voru í gaslögn
- Þétting á háþrýstipjöppum var tímafrek.
- Efnisval í búnaði reyndist ekki rétt.
- Prófanir á eimingarsúlu benda til að aðferðin geti gengið, en vegna útfellingu brennisteins og tæringar á svörtu stáli hefur ekki tekist að ljúka prófunum.

2 FYRSTA ÁFANGA SULFIX LOKIÐ

Prófanir á niðurdælingu blöndu CO₂ og H₂S í háhita jarðhitakerfi hófust í desember 2011. Tilgangurinn var að prófa á smærri skala mögulega útfærslu á aðferð til að minnka útblástur jarðhitagass frá Hellisheiðarvirkjun. Tilraunahola var valin og niðurdælingarbúnaður settur upp í Sleggjubeinsdal.

Upphaflegur tilgangur SulFix tilraunarinnar var eftirfarandi:

1. Athuga hvort það væri tæknilega mögulegt að leysa brennisteinsvetni upp í skiljuvatni og dæla því ofan í jörðina.
2. Fá niðurstöður um það hvaða áhrif niðurdælingin hefur á niðurdælingarholuna.
3. Auka skilning á því hvað verður um brennisteinsvetnið sem fargað er með þessum hætti.

⁵ Edda Sif Aradóttir (2013b)

⁶ Bergur Sigfússon o.fl. (2011)

⁷ VGK-Hönnun (2007)

⁸ Ingólfur Hrólfsson (2010)

⁹ Magnús Þór Arnarson (2011)



Töluverðar tafir urðu á verkefninu vegna ýmiskonar vandræða með afhendingu gass frá gasskiljustöðinni sem sá verkefninu fyrir gasi til niðurdælingar. Prófanir á niðurdælingu hófust fyrir alvöru í júlí 2012 og var þá dælt í nokkrar vikur. Meginhluti niðurdælingarinnar fór þó fram í október – desember 2012. Milli 80-100 tonnum af gasi var dælt niður. Samfara henni var fylgst náið með breytingum á efnasamsetningu í nærliggjandi borholu til að sannreyna bindingu brennisteinsvetnis í jörðu.¹⁰

Mikilvæg reynsla fékkst við tilraunina sem nýtist beint við hönnun á niðurdælingu á stærri skala. T.d. gekk illa að blanda gasinu í óblandað skiljuvatn því útfellingar kísils mynduðust í blöndunarstútnum. Upplýsing í þéttivatni gekk betur vegna þess að það inniheldur nánast engin uppleyst efni.

Vitneskja um áhrif niðurdælingar gass á niðurdælingarholuna er mjög mikilvæg. Ef niðurdæling á gasi hefur þau áhrif að niðurdælingarholurnar stíflast á stuttum tíma er um að ræða aukinn rekstrarkostnað við þessa gasförgunaraðferð því kostnaður við að bora nýja holu er á bilinu 500-700 milljónir. Til að meta áhrifin á borholuna var lekt holunnar mæld fyrir og eftir gasniðurdælinguna¹¹. Ádælingarstuðullinn fyrir niðurdælingu á gasinu var 0,75 l/s/bar en 1,10 l/s/bar á eftir. Þetta þýðir að lektin í holunni hefur aukist á meðan á niðurdælingunni stóð. Hugsanlega er hér um að ræða áhrif frá því að nota kaldara vatn meðan á niðurdælingu gasblandaðs þéttvatnsins stóð. Ekki fæst niðurstaða á þessu stigi málsins um hvort þessi aukna lekt sé tilkomin vegna hitastigs vatnsins en hins vegar má draga þá ályktun að engar vísbendingar eru um að niðurdælingarholan sé að stíflast vegna gasniðurdælingarinnar.

3 REGLUGERÐ 514/2010

Þann 1. júní 2010 tók gildi reglugerð nr. 514/2010 um styrk H₂S í andrúmslofti. Viðmiðunarmörk H₂S í andrúmslofti fyrir almenning eru lág. Hámark daglegra hlaupandi 24 stunda meðaltal er 50 µg/m³ eða þriðjungur sambærilegra marka Alþjóða heilbrigðismálastofnunarinnar (WHO) sem eru 150 µg/m³. Frá og með 1. júlí 2014 mun reglugerðin taka gildi án vikmarka¹².

Í athugasemdum til umhverfisráðuneytisins í árslok 2009¹³ hafði OR bent á að stefnt væri að því að setja þrengri viðmiðunarmörk (50 µg/m³) en WHO legði til (150 µg/m³). Á fundi umhverfisráðuneytis með fulltrúum Umhverfisstofnunar, Samorku og orkufyrirtækja þann 25. mars 2010 var niðurstaðan sú að miðað yrði við mörk WHO og ekki sett þrengri mörk hérlendis, nema að fengnum áreiðanlegum upplýsingum um heilsufar fólks¹⁴. Reyndin varð hins vegar önnur og voru sett þrengri mörk í reglugerðinni. OR gerði athugasemd við að umhverfismörk án vikmarka tækju gildi 1. júlí 2012 og mælti með því í umsögn sinni að það ætti sér ekki stað fyrir en árið 2014 vegna seinkana á prófunum á tilraunagasskiljustöð. Orðið var við þessari ábendingu.

3.1.1 VIÐMIÐUNARMÖRK Í REGLUGERÐ NR. 514/2010

Viðmiðunarmörk H₂S í andrúmslofti fyrir almenning eru lág og er hámark daglegra hlaupandi 24 stunda meðaltal 50 µg/m³, tafla 1. Sambærileg mörk WHO eru 150 µg/m³ eða þrisvar sinnum hærrí. Fram til 1. júlí 2014 er leyfilegt að fara fimm sinnum á ári yfir þessi mörk (50 µg/m³) en eftir þann tíma er aldrei leyfilegt að fara yfir mörkin. Í reglugerðinni eru ennfremur skilgreind tilkynningarmörk. Fram til 1. júlí 2014 þarf viðkomandi heilbrigðisnefnd að

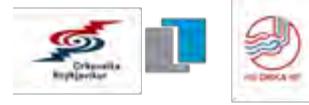
¹⁰ Ingví Gunnarsson (2013a)

¹¹ Gunnar Gunnarsson (2013)

¹² Reglugerð um styrk brennisteinsvetnis (H₂S) í andrúmslofti. nr. 514/2010.

¹³ Hjörleifur B. Kvaran forstjóri og Hólmfríður Sigurðardóttir (2009)

¹⁴ Gústaf Adolf Skúlason (2010)



tilkynna almenningi þegar H_2S hefur mælst yfir $150 \mu g/m^3$ samfelt í 3 klst., en eftir 1. júlí 2014 lækka tilkynningarmörkin í $50 \mu g/m^3$. Í reglugerðinni eru sett mörk fyrir ársmeðaltal sem er $5 \mu g/m^3$ sem er lágt. WHO hefur ekki sett heilsuverndarmörk með ársmeðaltal sem viðmiðunartíma.

3.2 HEILSUFARSÁHRIF

Viðmiðunarmörk sem gefin hafa verið út fyrir styrk H_2S í andrúmslofti eru ýmist byggð á heilsufarsrannsóknum eða óþægindaviðmiðum. Alþjóða heilbrigðismálastofnunin og umhverfisvöld í Bandaríkjunum hafa hvatt til frekari rannsókna á heilsufarsþættinum, ekki síst þar sem niðurstöður þeirra eru ekki samhljóða og að erfitt sé að draga ályktun af niðurstöðum þeirra^{15,16,17}. Í töflu 2 er getið helstu viðmiða og þeirra öryggismarka sem þau miðast við. Þeir aðilar, sem gefið hafa út viðmið eða mörk, og getið er í töflu 2, styðjast við sömu grunnupplýsingar en deila í hana með mismunandi öryggisstuðli að teknu tilliti til eðlis þeirra marka sem gefin eru út¹⁸.

TAFLA 1 - BAKGRUNNUR NOKKURRA VIÐMIÐA FYRIR BRENNISTEINSVETNI (H_2S) Í ANDRÚMSLOFTI^{19,20,21}.

| Aðili | $\mu g/m^3$ | Skýring | Athugasemdir |
|------------|-------------|--|---|
| WHO | 60.000 | Talið geta valdið augnskaða | |
| WHO | 15.000 | Talið geta valdið augnertingu | Rannsóknarniðurstöður |
| WHO | 150 | Útgefið viðmið | Sólarhringsmeðaltal með öryggisstuðli 100 |
| WHO | 7 | Lyktarmörk | 30 mínútna meðaltal |
| WHO | 2.800 | Áhrif á astmaveika einstaklinga | Rannsóknarniðurstöður |
| WHO | 100 | Hugsanlegt viðmið | Sólarhringsmeðaltal með öryggisstuðli 30 |
| WHO | 14.000 | Hæsti styrkur þar sem engin áhrif mældust á rottur | Rannsóknarniðurstöður. Vinnuverndarmörk |
| WHO | 630 | Umreiknað yfir í áhrif á menn | |
| WHO | 20 | Hugsanlegt langtíma viðmið | Hugsanlegt 2-3 mánaða viðmið með öryggisstuðli 30 |
| Kalifornía | 11 | Lyktarmörk | Einnig viðmið fyrir ársmeðaltal |
| Kalifornía | 42 | Óþægindamörk (einkum höfuðverkur og ógleði) | 30 mínútna meðaltal |
| EPA | 2 | Áhættumatskerfi | Gengið út frá langtímaáhrifum og öryggisstuðull 300 settur á ertingarmörk WHO |

Íslensk rannsókn á tengslum styrks brennisteinsvetnis í andrúmslofti og ávísun á astmalyf, sem gerð var á árunum 2006-2009, sýndi ekki afgerandi niðurstöðu. Í tímaritsgrein um hana lýsa rannsakendur niðurstöðum sínum svo í þýðingu OR: Niðurstöður okkar benda til að aukið magn svifryks frá umferð og frá náttúrulegum uppsprettum sem og aukinn styrkur brennisteinsvetnis, sem finnst í skamman tíma, hafi veika fylgni við aukna ávísun astmalyfja á höfuðborgarsvæðinu. Aðrir þættir, sem ekki voru rannsakaðir, kunna að hafa áhrif á þessa veiku fylgni og er frekari rannsókn því þörf²².

Þekkingargrunnur til að setja bindandi mörk fyrir H_2S er ekki sterkur þegar miðað er við önnur loftmengandi efni sem mörk hafa verið sett fyrir. Þar hafa mörk verið byggð á faraldsfræðilegum rannsóknum sem sýna líkur á áhrifum miðað við tiltekin mörk. Í íslenski reglugerð nr. 514/2010 eru mörk $50 \mu g/m^3$ miðuð við sólarhringsgildi og

¹⁵ WHO (2003)

¹⁶ Kristinn Tómasson og Friðrik Daníelsson (2010)

¹⁷ Sheldon Roth, Verona Goodwin (2003)

¹⁸ Þór Tómasson (2012)

¹⁹ WHO (2003)

²⁰ WHO (2000)

²¹ SAVOLAINEN, H. (1982)

²² Hanne Krage Carlsen, Helga Zoëga, Unnur Valdimarsdóttir, Þórarinn Gíslason, Birgir Hrafnkelsson (2012).



5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ miðuð við ársmeðaltal. Bæði þessi mörk eru með strangari mörkum sem sett hafa verið og réttaráhrif þeirra mikil þar sem skilgreina þarf þynningarsvæði fyrir starfsemi/svæði þar sem gera má ráð fyrir að styrkur mælist yfir þessum mörkum og innan þynningarsvæðis eru takmarkanir á landnotkun.

Þynningarsvæði umhverfis virkjanir Orkuveitu Reykjavíkur á Hengilssvæðinu hefur ekki verið skilgreint, sbr. reglugerð nr. 514/2010. Vinna við skilgreiningu þess er hafin og að henni koma heilbrigðisfyrirvöld og Orkuveita Reykjavíkur. Þegar stærð þynningarsvæðis er ákvörðuð skal taka mið af landfræðilegum og veðurfræðilegum aðstæðum og hæfni viðtaka til þess að dreifa mengun. Orkuveita Reykjavíkur styrkir því eftirfarandi rannsóknir á vegum Háskóla Íslands:

- Rannsókn þar sem fylgst er með dreifingu brennisteinsvetnis frá Reykjavík til Þingvalla, á Selfoss, til Þorlákshafnar, Bláfjalla og Hveragerðis. Dreifingin er skoðuð með hliðsjón af veðri og útskolun

úr andrúmslofti²³.

- Rannsókn á dreifingu brennisteinsvetnis á þremur þversniðum á höfuðborgarsvæðinu m.t.t. landslags²⁴.

Vorið 2012 hófst samstarf Orkuveitu Reykjavíkur við Landsvirkjun og HS-Orku um að leita leiða til að finna umhverfisvæna og hagkvæma lausn til að draga úr styrk brennisteinsvetnis í andrúmslofti, sjá nánar í kafla 3.4 Fyrirtækin þrjú styðja við rannsóknir á vegum Háskóla Íslands sem eiga að varpa ljósi á:

- Möguleg heilsufarstengd áhrif brennisteinsvetnis á fólk^{25 26}.

Há gildi í byggð hafa mælst þegar kalt er í veðri, að næturlagi eftir sólsetur, þegar vindur er hægur og lítil blöndun lofts. Þess er vænst að niðurstöður ofangreindra rannsókna muni nýtast til að bæta líkón af dreifingu brennisteinsvetnis, í faraldsfræðilegum rannsóknum á heilsufarsáhrifum í byggð og til að auka upplýsingar til almennings.

3.3 LOFTGÆÐAMÆLINGAR

Í samræmi við ákvæði í starfsleyfi hefur Orkuveita Reykjavíkur ráðist í umfangsmikla vöktun á styrk brennisteinsvetnis í andrúmslofti á virkjunarsvæðum og í byggð. Í þeim tilgangi hafa verið settar upp fjórar síritandi loftgæðamælistöðvar sem reknar eru í samstarfi við Heilbrigðiseftirlit Suðurlands. Þær eru í Hveragerði, í Norðlingaholti, á iðnaðarsvæðinu við Hellisheiðarvirkjun og sumarið 2012 var sett upp loftgæðamælistöð á iðnaðarsvæðinu við Nesjavallavirkjun. Niðurstöður mælinga í rauntíma eru almenningi aðgengilegar á heimasíðum stjórnvalda.

Á árinu 2012 hefur verið unnið að úrbótum í loftgæðamælistöðvum í samstarfi við Heilbrigðiseftirlit Suðurlands. Nýr aðili tók við rekstri og viðhaldi mælistöðvanna um mitt ár 2012. Það ár var unnið að og lokið við endurskoðun á notendaviðmóti fyrir almenning á vef Heilbrigðiseftirlits Suðurlands.

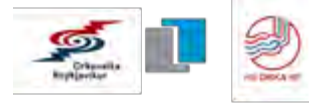
Á árinu 2012 er einungis unnt að meta ársmeðaltal fyrir styrk brennisteinsvetnis í andrúmslofti þar sem mælingar eru ekki samfelldar. Mælingar vantar frá júní og júlí í Norðlingaholti en þá var mælitækið óvirkt og frá júní til ágúst í Hveragerði en þá var loftdæla óvirkt. Þær mælingar sem vantar eru frá því tímabili ársins þar sem ætla má að styrkur brennisteinsvetnis mælist lægstur vegna veðurskilyrða. Árið 2012 var áætlaður styrkur brennisteinsvetnis yfir ársmeðaltalinu í Hveragerði (6,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) og undir ársmeðaltalinu í Norðlingaholti (4,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Mæliskekka er ekki birt með þessum gögnum.

²³ Snjólaug Ólafsdóttir (2013)

²⁴ Þróstur Þorsteinsson (á.á.)

²⁵ Þórarinn Gíslason (2012)

²⁶ Hildur Ingvarsdóttir (2012)



Unnið er að gerð verklagsreglu um túlkun og meðhöndlun gagna frá loftgæðamælistöðvunum. Í Norðlingaholti fór styrkur H₂S einu sinni yfir viðmiðunarmörk fyrir hámark daglegs hlaupandi 24 stunda meðaltal (50 µg/m³) og einu sinni yfir mörkin í Hveragerði. Styrkur H₂S var undir tilkynningarmörkum (150 µg/m³).

3.4 SAMSTARF JARÐORKUFYRIRTÆKJA

Orkufyrirtækin þrjú, OR, Landsvirkjun og HS Orka, sem nýta háhita hér á landi hafa sameiginlega hagsmuna að gæta varðandi brennisteinsvetni frá jarðvarmavirkjunum. Í apríl 2012 var stofnaður undirbúningshópur með fulltrúum fyrirtækjanna til að koma á fót formlegu samstarfi. Samningur um samstarfið var gerður 9. maí 2012 og stýrihópur skipaður. Sjá nánar í kafla 9 [stjórnskipulag verkefnisins].

4 MARKMIÐ VERKEFNISINS

Markmiðum verkefnisins má skipta í aðalmarkmið samstarfs orkufyrirtækjanna þriggja og síðan undirmarkmið, sem Orkuveita Reykjavíkur og önnur fyrirtæki vinna að samhliða, á eigin vegum eða á vettvangi samstarfsins.

4.1 MEGINMARKMIÐ

Meginmarkmið SulFix verkefnisins er að þróa varanlega, hagkvæma lausn svo að styrkur brennisteinsvetnis í andrúmslofti frá jarðvarmavirkjunum sé í samræmi við reglugerðir hverju sinni, þ.m.t. reglugerð nr. 514/2010. Lausnin verði prófuð og sýnt fram á virkni hennar í rekstri Hellisheiðarvirkjunar.

Orkufyrirtækin hafa skuldbundið sig til að taka upp faglegt samstarf og gagnkvæma miðlun upplýsinga sem snýr að viðfangsefni þessu. Stýrihópur hins sameiginlega verkefnis skal sýna ábyrga stjórnarhætti, virða umhverfissjónarmið og stuðla að traustu og uppbyggilegu samstarfi við stjórnvöld, sveitarfélög og aðra hagsmunaaðila²⁷.

4.1.1 UNDIRMARKMIÐ 1

Að sú lausn, sem verður valin, sé viðunandi frá fjölþættari umhverfissjónarmiðum en fram koma í reglugerð 514/2010, svo sem takmörkun förgunar í landi og sjálfbærni í rekstri, þ.e. að hún myndi hugsanlega tekjustrauma fyrir rekstur jarðgufuvirkjana.

4.1.2 UNDIRMARKMIÐ 2

Að efla vísindalega þekkingu og hagnýtingu hennar með nýsköpun. Þetta felur í sér að niðurstöður rannsóknarverkefna, verði opinberar og að orkufyrirtækin nýti þær til framþróunar á starfsemi sinni.

4.1.3 UNDIRMARKMIÐ 3

Efla sátt um nýtingu jarðhitaauðlindarinnar. Útblástur brennisteinsvetnis hefur skaðleg áhrif á ímynd jarðhitanýtingar hér á landi og í útlöndum. Ótti hefur kviknað meðal almennings um hugsanleg skaðleg áhrif útblástursins á heilsu fólks og því er áriðandi fyrir núverandi og frekari jarðhitanýtingu að besta lausnin finnist.

5 FRAMKVÆMDIN – SULFIX OG AÐRAR MÖGULEGAR LAUSNIR

Við undirbúning verkefnisins hafa margar leiðir að markmiðum þess verið skoðaðar og metnar. Þessar eru helstar:

²⁷ Bjarni Bjarnason, Ragna Árnadóttir og Júlíus Jónsson (2012)



- a) Þekktar iðnaðarlausnir til hreinsunar brennisteinsvetnis úr gasi frá olíu- og kolaiðnaði, sem skilja eftir sig brennisteins eða brennisteinssýru sem afurðir^{28 29 30}.
- b) Þekktar iðnaðarlausnir til að draga úr staðbundnum styrk í andrúmslofti, s.s. útblástursháfur. Þessi aðferð eykur dreifingu brennisteinvetnis í andrúmslofti en minnka ekki útblástur³¹.
- c) Innflutningur á lúti til að leysa upp súrt gasið sem gerir það „umhverfislega hlutlaust“³².
- d) Hugmyndir að hagnýtingu jarðhitagassins, sem enn eru í þróun, s.s.
 - i. lífræn aðferð sem nýtir brennisteinsvetnis og vetniskærar örverur til prótínframleiðslu (Prókatín).
 - ii. efnafræðileg aðferð til framleiðslu metanóls (Carbon Recycling).
 - iii. Nýting á koldíoxíð til ræktunar matvæla (GeoPomodoro)

Í samanburði við ofangreindar lausnir telst niðurdæling brennisteinsvetnis og binding þess í jarðlögum hafa minnst umhverfisáhrif^{33 34}. Því ræður að brennisteininum er skilað aftur djúpt niður í jarðhitakerfið í sama ástandi og hann kom upp á jarðhitasvæðinu. Aðferðin miðast við að notast er við náttúrelg ferli til bindingar brennisteinsvetnis í berggrunninum³⁵ og er því ekki þörf umfangsmikillar förgunar á yfirborði eða, flutningur innanlands á brennisteini og brennisteinssýru ásamt því að innflutningur á varasömum efnum á borð við lút verður óþarfur og síðast en ekki síst er niðurdælingin metin fjárhagslega hagkvæmust fyrir rekstur virkjananna og þar með fyrir neytendur. Ef þær lausnir, sem verða valdar á hreinsun brennisteinsvetnisins, eru mjög kostnaðarsamar, má búast við að sá kostnaður komi fram í verði til neytenda sem þurfa að greiða fyrir þær aðgerðir sem ráðist verður í til að uppfylla reglur um losun brennisteinsvetnis.

Þar sem niðurdæling brennisteinsvetnis í jarðlög og binding þess sem brennisteinskís (pýrít eða glópagull)) eða skyldar steindir er í eðli sínu nýsköpunar- og þróunarverkefni, verður samhliða þróun þeirrar lausnar að halda öðrum leiðum opnum. Fræðilegar úttektir á afdrifum brennisteinsvetnis sem dælt er aftur ofan í jarðhitakerfið benda til að brennisteinsvetnið myndi steindir í holrými jarðhitakerfisins³⁶. Til afla frekari vitneskju um afdrif brennisteinsvetnisins sem dælt er niður, er stefnt að því að gera tilraun á rannsóknarstofu þar sem líkt er eftir þeim aðstæðum sem vænta má í jarðhitageyminum³⁷. Við hverja vörðu í SulFix-verkefninu, verður metið hvort það er líklegra, með hliðsjón af markmiðum verkefnisins að halda því áfram eða taka í notkun hefðbundnari lausnir sem nýttar eru í olíu- og gasiðnaði, með þeim göllum sem þeim fylgja.

Skiljuvatn frá jarðgufuverum hefur tilhneigingu til að fella út kísil sem getu valdið rekstrarvanda með því að stífla pípur og niðurdælingaholur. Reynslan hefur sýnt að sýring skiljuvatns niður fyrir pH 6 minnar mjög útfellingahættuna og víða erlendis er sýringu með sterkum sýrum beitt til að koma í veg fyrir útfellingu kísils og auðveldar þannig rekstur niðurdælingaveita. Sambærilegum sýringaráhrifum er hægt að ná með því að blanda brennisteinsvetninu úr jarðvarmagasinu saman við skiljuvatnið og minnka þannig hættu útfellinga kísils úr útfellingavatninu. Við Hellsheiðarvirkjun er nú þegar hafin tilraun með gassýringu skiljuvatns í smáum skall (sjá

²⁸ Mannvit (2012b)

²⁹ Auður A. Óladóttir, Daði Þorbjörnsson, Guðmundur H. Guðfinnsson, Halldór Ármannsson, Magnús Á. Sigurgeirsson, Þráinn Friðriksson (2011).

³⁰ Mannvit (2011)

³¹ Hjalti Sigurjónsson, Jean-Claude C. Berthet, Sveinn Óli Pálmason (2012).

³² Kristín Vala Matthíasdóttir (2013)

³³ Ingvi Gunnarsson, Bergur Sigfússon, Andri Stefánsson, Stefán Arnórsson, Samuel Warren Scott, Einar Gunnlaugsson (2011).

³⁴ Edda Sif Aradóttir, Ingvi Gunnarsson, Bergur Sigfússon, Gunnar Gunnarsson, Einar Gunnlaugsson, Hólmfríður Sigurðardóttir, Einar Jón Ásbjörnsson og Eric Sonnenthal (2012)

³⁵ Andri Stefánsson, Stefán Arnórsson, Ingvi Gunnarsson, Hanna Kaasalainen (2009).

³⁶ Andri Stefánsson, Stefán Arnórsson, Ingvi Gunnarsson, Hanna Kaasalainen, Einar Gunnlaugsson (2011).

³⁷ Sigurður H. Markússon (2013)



nánar „Útfellingar í skiljuvatni, tilraun“ í kafla 7) . Takist þetta eins og vonir standa til þá mun SulFix aðferðin hjálpa til með að leyst tvö vandamál jarðvarmastöðva á umhverfisvænan hátt þ.e. fjarlægja brennisteinsvetnið og bæta niðurdælingarferilinn.

Fyrsta áfanga SulFix verkefnisins er nýlokið, sjá nánar í kafla 8.1 fargað var allt að 2% af H_2S gasinu frá Hellisheiðarvirkjun.

Í öðrum áfanga SulFix verkefnisins er áætlað að dæla niður 15 - 30% af gasinu frá Hellisheiðavirkjun. Torleystu gösin (H_2 , N_2 , CH_4 og Ar) verða aðskilin frá H_2S og CO_2 í þvottaturni sem notast við þéttivatn frá vélasamstæðum. Gösunum verður síðan dælt aftur niður í jarðhitageyminn uppleystum í þéttivatninu.

Í þriðja áfanga SulFix verkefnisins er áætlað að aðskilja H_2S frá öðrum jarðhitagösnum með Amínþvottakerfi, og dæla því niður með affalsvatni virkjunarinnar. Uppsettur búnaður til niðurdælingar frá öðrum áfanga nýtist til förgunar á auknu magni brennisteinsvetnis þar sem búið er að fjarlægja stóran hluta af CO_2 úr jarðvarmagasinu með hjálp amínþvottakerfisins. Eftir þennan áfanga er reiknað með að búið sé að minka brennisteinsvetnisútblastur frá Hellisheiðarvirkjun um 50%.

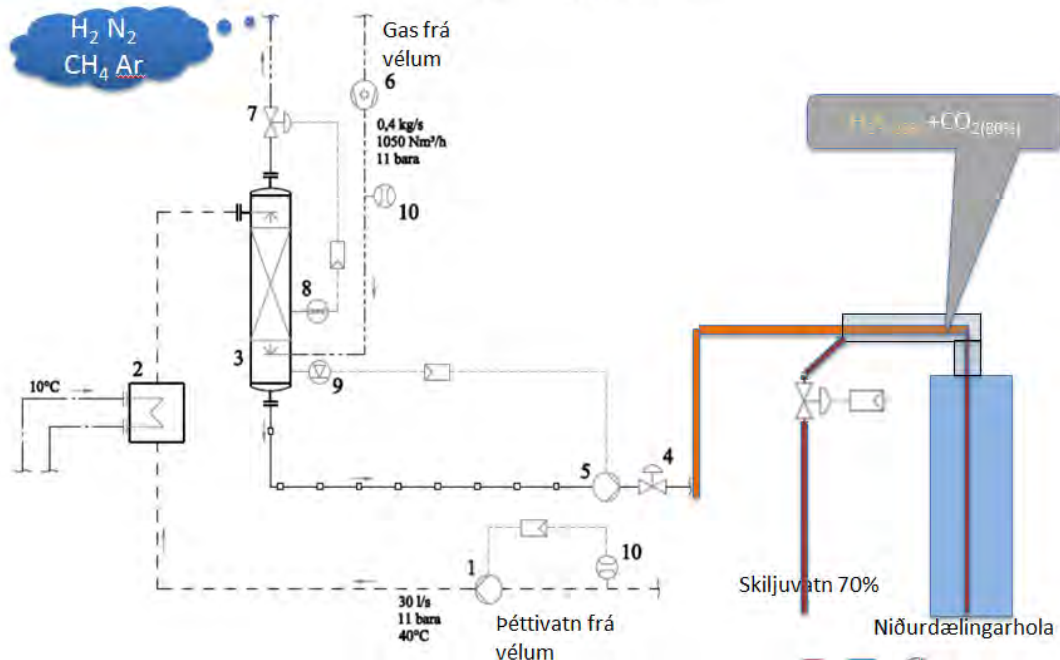
Í fjórða áfanga SulFix verkefnisins er áætlað að tvöfalda Amínþvottakerfið til að hreinsa úr útblæstri Hellisheiðarvirkjunar afganginn af brennisteinsvetnisgasinu sem þörf er á til að uppfylla viðmiðunarmörk um styrk brennisteinsvetnis í andrúmslofti. Þegar búið er að aðskilja brennisteinsvetnið frá öðrum jarðhitagösnum með amínþvottakerfi er um tvær mögulegar leiðir til að dæla því aftur ofan í jarðhitageyminn. Annar möguleikinn er að leysa allt gasið upp í tiltölulega litlu vatni og dæla því ofan í jarðhitakerfið. Þessi leið felur í sé að brennisteinsvetni verður í mjög háum styrk í vatninu og það því tærandi. Hönnun niðurdælingarholu tekur mið af því. Hin leiðin er að blanda brennisteinsvetninu í allt skilju og þéttivatn virkjunarinnar. Að því gefnu að pH gildi vatnsins verði ekki undir 6 er það ekki tærandi og sérstakra ráðstafanna ekki þörf til að koma í veg fyrir tæringu. Með þeim hætti er hægt að fagra allt að 50 % brennisteinsvetnisins frá Hellisheiðarvirkjun.

Komi í ljós ófyrirséð vandkvæði við niðurdælinguna og að markmiðum verkefnisins verði betur náð með öðrum hreinsiaðferðum³⁸, verður unnt að nýta hluta þess búnaðar sem búið er að fjárfesta í við uppsetningu þeirra.

³⁸ Mannvit (2012b)

Annar áfangi

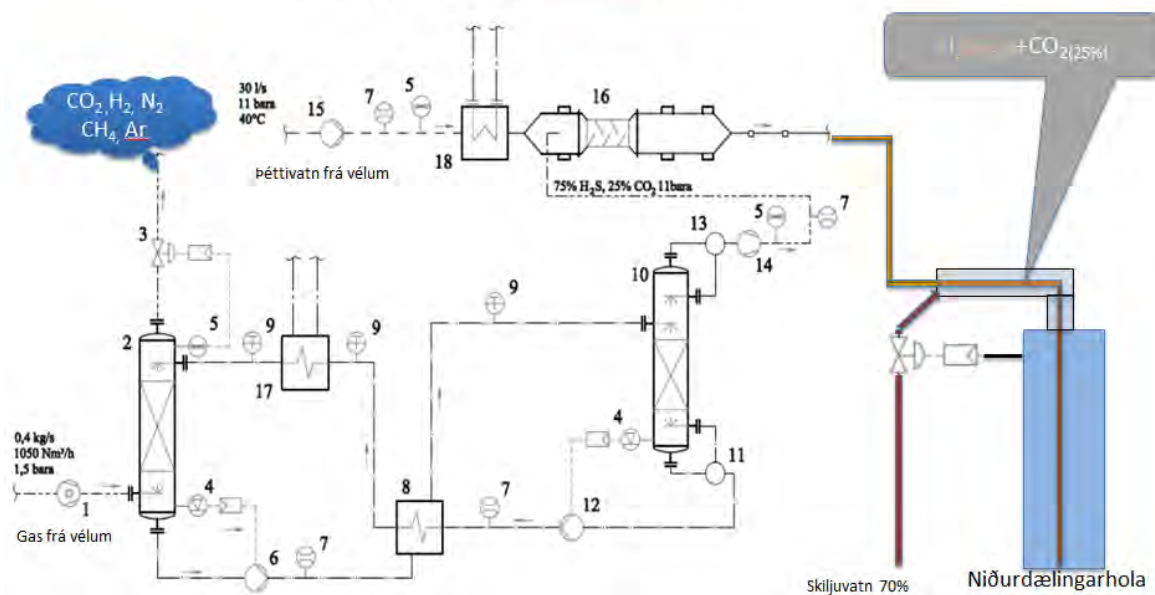
Vatnsþvottaferli í mótstreymisturni



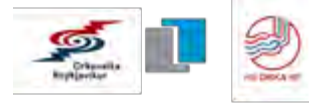
MYND 1 ANNAR ÁFANGI SULFIX LAUSNAR

Þriðji áfangi

Aðskilja CO₂ gas með Aminþvottakerfi



MYND 2 ÞRIÐJI ÁFANGI SULFIX LAUSNAR



6 VERKEFNISGREININGAR

Verkefnishópurinn hefur gert verkefnisgreiningar til að greina mögulegar hættur og meta hvaða ráðstafanir þarf að gera til að draga úr líkum á að þær trufla framgang verkefnisins eða ógni markmiðum þess. Niðurstöður áhættugreiningarinnar voru nýttar við gerð verkefnisáætlunar (sjá kaflann Meginrás verkefnisins) og á meðal þeirra aðgerða sem gripið er til, er að gert er ráð fyrir tilraunum í stækkuðum skala og aukin áhersla lögð á að fá til samstarfs ytri sérfræðinga; ráðgjafa og framleiðendur búnaðar. Skipting verkefnisins í áfanga, þar sem metin er árangur við skilgreindar vörður áður en áfram er haldið, er einnig afrakstur þessarar greiningar.

Einnig var umhverfi verkefnisins greint (PESTLE) ásamt hagsmunaaðilagreiningu. Niðurstöðu þessar voru nýttar við gerð stjórnskipulags verkefnisins (sjá kaflann Stjórnskipulag) og í samskiptaáætlun þess (sjá kaflann (Samskipti og samskiptaleiðir).

7 AÐFÖNG OG FJÁRMÁL

Helstu aðföng verkefnisins er sú þekking og reynsla sem byggst hefur upp í undanförunum tilraunarverkefnum, tengdum gasförgun á Hellisheiði sem hafa verið í gangi allt frá árinu 2006. Í tengslum við þessi verkefni hefur myndast tengslanet sérfræðinga á þessu sviði, jafnt innan orkufyrirtækjanna og hjá ráðgjöfum og menntastofnunum innanlands og erlendis³⁹. Þessi þekking mun án efa nýtast við þróun og framkvæmd SulFix verkefnisins ásamt frekari hagnýtingu jarðvarmagassins.

Orkufyrirtækin búa yfir áratuga reynslu af stjórnun framkvæmdaverka og rekstri flókins búnaðar sem mun án efa nýtast í þessu verkefni.

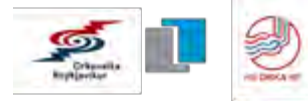
Til þessa hefur Orkuveitan varið um 450 m.kr í rannsóknir og tilraunarverkefni sem tengjast SulFix jarðvarma gösum á Hellisheiði, auk 315 m.kr. framlag til CarbFix kolefnisbindingarverkefnis. Sjá töflu hér fyrir neðan sem sýnir þetta ásamt væntanlegum viðbótarkostnaði til ársins 2020 í þessum verkefnum.

| Gasverkefni OR á Hellisheiði (m.kr.) | Áfallið 2006-2012 | Áætlað 2013 | Eftirstöðvar 2014-2020 |
|---|----------------------|----------------|---------------------------|
| SulFix lausn og tengd verkefni | 450 | 375 | 800 |
| CarbFix tilraunaverkefnið, kostnaður OR | 315 | 50 | 30 |
| Samtals 7m.€ (1.200m.kr.) 2006-2011 | | | |

Í nýsköpunar og þróunarverkefnum eins og þessu þar sem verið er að prófa þekktan búnað við nýjar aðstæður, er óvissan í áætlanagerðinni mikil og því erfitt að áætla hver verður endanlegur kostnaður við að uppfylla öll markmið verkefnisins. Til að fá hugmynd um kostnaðinn er nauðsynlegt að bera saman leiðir

til að losa brennisteinsvetni úr jarðvarmagasi frá Hellisheiðarvirkjun. Í töflunni hér að neðan er samanburður (í m.kr.) á stofn- og rekstrarkostnaði hefðbundinna iðnaðarlausna (stuðst við áætlun fyrir Hverahlíðarvirkjun) samanborið við áætlun fyrir SulFix lausnina, miðað við að það þurfi að losa allt brennisteinsvetnið úr jarðvarmagasinu. Í þessari áætlun er hvorki gert ráð fyrir að bora þurfi niðurdælingarholu, sérstaklega fyrir losun brennisteinsvetnis, né reiknað með mögulegum tekjum af sölu brennisteins eða brennisteinssýru fyrir iðnaðarlausnina.

³⁹ Mamrosh, D., McIntush, K., Beitler, C., Sigurður H. Markússon, Kristján Einarsson (2012)



| Iðnaðarlausn | | Sulfix | | Mismunur | |
|--------------|---------------------------|-------------|---------------------------|-------------|---------------------------|
| Stofnkostn. | Rekstrarkostn. (pr.ár) | Stofnkostn. | Rekstrarkostn. (pr.ár) | Stofnkostn. | Rekstrarkostn. (pr.ár) |
| 5.500 | 700 | 1.250 | 100 | 4.250 | 600 |

Fjárhagsáætlun Orkuveitu Reykjavíkur 2013 vegna gas verkefnastofns er 425 m.kr. auk þess sem hin samstarfsfyrirtækin verja samanlagt um það bil 20 m.kr. til viðbótar í verkefnið á árinu.

| Gas verkefnastofn Orkuveitu Reykjavíkur 2013 | M.kr. |
|--|------------|
| H2S samstarf OR, LV, HS | 25 |
| Gasskiljustöð | 38 |
| CarbFix | 50 |
| SulFix 2. Áfangi | 279 |
| Útfellingar í skiljuvatni, tilraun ^{40,41} | 16 |
| Tracer, ferilprófanir á niðurdælingarvatni ⁴² | 17 |
| Samtals | 425 |

Það verður ekki fyrr en að loknu samráði við framleiðendur á dælu- og gasþvottabúnaði sem hægt verður að áætla heildarkostnað verkefnisins með ábyggilegri hætti.

8 MEGINRÁS VERKEFNISINS

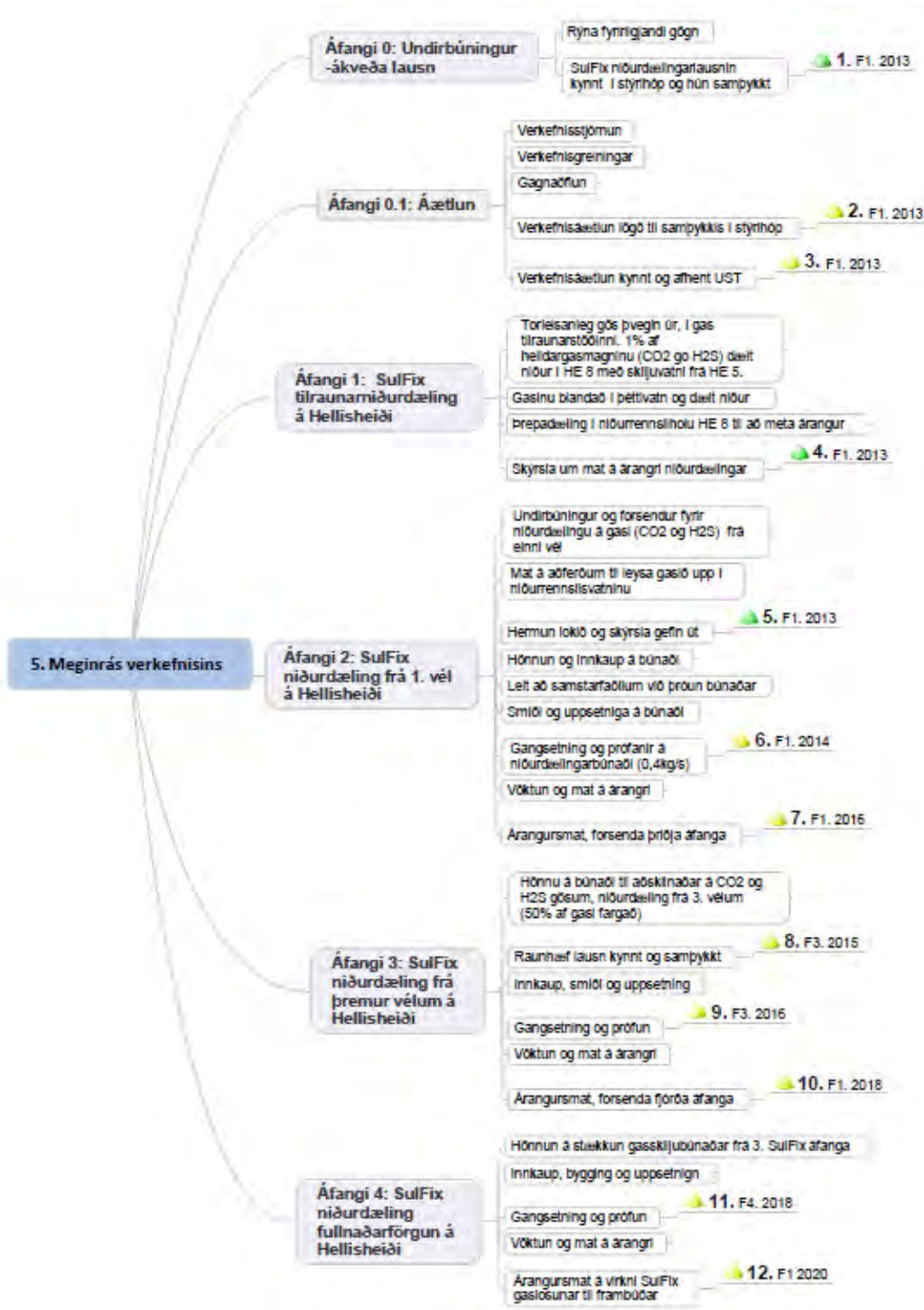
Eins og fram hefur komið er markmið verkefnisins að þróa og útfæra hagkvæma aðferð til að draga úr losun brennisteinsvetnis frá jarðvarmavirkjunum. Við þróun aðferðarinnar er horft til þess að lágmarka notkun aðfluttra efna og uppsöfnun efna sem geta verið skaðleg fyrir umhverfið. Verkefninu er skipt niður í nokkra áfanga og hverjum áfanga niður í verkþætti og undirverkþætti eftir þörfum. Mynd 3. sýnir áfangaskiptingu verkefnisins ásamt vörðum þar sem ákveðnar niðurstöður og ákvarðanir þurfa að liggja fyrir til að halda megi áfram með verkefnið samkvæmt fyrirbyggjandi áætlun. Áður en hafist er handa við nýjan áfanga, þarf að skoða árangurinn frá þeim fyrri og meta hvort og hve mikil þörf sé á frekari hreinsun, til að uppfylla viðmið um losun brennisteinsvetnis. Áður en ráðist er í nýjan áfanga þarf að fá samþykktar fjárveitingar og önnur aðföng til verkefnisins. Í ljósi þess að þetta er nýsköpunar- og þróunarverkefni sem byggir á niðurstöðum rannsókna og verið er að laga notkun á þekktum búnaði og ferlum að nýjum þörfum, þá ríkir nokkur óvissa um niðurstöður. Til að mæta óvissunni í SulFix verkefninu verður samhliða unnið að upplýsingaöflun um aðrar þekktar lausnir (sem fjallað er um í kafla 5.) og haldið áfram að þróa og vinna að hagnýtingu jarðhitagassins.

⁴⁰ Ingvi Gunnarsson (2013)

⁴¹ Bergur Sigfússon, Ingvi Gunnarsson (2011)

⁴² Edda Sif Aradóttir (2013)

8.1 ÁFANGASKIPTING



MYND 3 ÁFANGASKIPTING VERKEFNIS



Áfangi 0, Undirbúningur -ákveða lausn. Rannsóknir og tilraunir sem verkefnið byggir á hafa staðið allt frá árinu 2007. Undirbúningur að verkefnisáætluninni hófst í byrjun nóvember 2012 þegar sameiginlegur verkefnisstjóri OR, LV, HS kom til starfa. Gagna var aflað og dregnar sama niðurstöður tilrauna fyrir þá niðurdælingalausn sem verkefnisáætlunin byggir á.⁴³ Áfanganum lauk með samþykki stýrihóps á SulFix lausninni 28. janúar 2013

Áfangi 0.1, Áætlun. Vinna við verkefnisáætlunina hófst formlega eftir samþykki á SulFix niðurdælingunni sem hér er lögð til í þeim tilgangi að draga úr losun brennisteinsvetnis frá Hellisheiðarvirkjun. Verkefnisáætluninni er ætlað að lýsa verkefninu eins vel og unnt er á þessu stigi, ásamt verkefnisgreiningum og stjórnskipulagi. Áætlunin inniheldur efnisatriði eins og sýnt er á mynd 3. Hún var lögð fyrir stýrihóp til samþykktar þann 18. febrúar 2013 og verður í framhaldinu kynnt og afhent Umhverfisstofnun. Í verkefnisáætluninni má finna margar vörður þar sem gerð er krafa um ákveðna niðurstöðu svo halda megji verkefninu áfram og þannig verður áætlunin lifandi „skjal“ á líftíma verkefnisins sem tekur breytingum eins og þörf krefur til að ná markmiðum þess.

Áfangi 1, SulFix fyrsti áfangi. Tilraunaniðurdæling. Tilgangur tilraunarinnar var að sannreyna hvort mögulegt sé að leysa brennisteinsvetni upp í skiljuvatni og dæla því ofan í jörðina. Fyrstu tilraunir hófust í desember 2011, en vegna margvíslegra tæknilegra örðugleika hófst stöðug niðurdæling ekki fyrr en í október 2012 og lauk í desember sama ár. Í kjölfarið var framkvæmd þrepaprófun á holunni til að meta árangur sem telst vera jákvæður samkvæmt minnisblaði 7. febrúar 2013^{44 45} og skapar forsendur til að hefja næsta áfanga.

Áfangi 2, SulFix annar áfangi. Niðurdæling á jarðvarmagasi frá einni vél. Í þessum áfanga er áætlað að hefja niðurdælingu á gasi í stórum stíl með þeim aðferðum sem þróaðar hafa verið í undanförunum tilraunum. Áfanginn hófst í byrjun árs 2013 með hermunarreikningum⁴⁶ á íblöndun 15-30% gassins frá Hellisheiðavirkjun, í þéttivatn sem dælt verður niður, ásamt skiljuvatni, í niðurdælingarholu á Húsmúlasvæðinu við Hellisheiðarvirkjun. Áður en niðurdælingin hefst og meðan á henni stendur, verður framkvæmd bakgrunnsvöktun á niðurdælingarsvæðinu ásamt því að fylgjast með örlögum gasanna í kerfinu með aðstoð ferilefna. Í þessum áfanga verður byggt gasskiljustöðvarhús sem rúmar þann búnað sem nauðsynlegur er til að uppfylla kröfur opinbera aðila. Í þessum áfanga verður notast við þvottaturn til að losna við torleysanlegu gösin og blanda H₂S og CO₂ gasi í þéttivatnið sem verður leitt að niðurdælingarsvæðinu og niður í jarðhitageyminn með sérstöku röri í niðurdælingarholu. Við hönnun og val á búnaði verður leitað samstarfs við erlenda aðila sem eru tilbúnir að koma að þróun á þessum búnaði fyrir jarðvarmavirkjanir. Áfangaskil verða í mars 2014 með gangsetningu og í framhaldinu verður vöktun og árangursmat til mars 2016 til að meta langtímaáhrif af niðurdælingunni.

Áfangi 3, SulFix þriðji áfangi. Aðskilnaður gasa og niðurdæling á 50 % af H₂S gasi frá Hellisheiðarvirkjun. Áfanginn hefst í mars 2015 með hönnun á ísogsbúnaði (amín kerfi) sem aðskilur H₂S og CO₂ gösin að stærstu leyti. Með því að losna við CO₂ gasið úr niðurdælingarvatninu skapast möguleiki á að losa helming H₂S gassins í sama magn niðurdælingarvatns og í fyrri áfanganum. Við þróun á búnaði til að aðskilja gösin verður leitað samstarfs við erlenda aðila sem hafa reynslu af sambærilegum ferlum úr olíuðnaðinum og eru tilbúnir að koma að þróun hennar fyrir jarðvarmaiðnaðinn. Áfangaskil verða með gangsetningu og prófunum í október 2016 en eftir það er gert ráð fyrir eftirfylgni og vöktun til janúar 2018. Í þessum áfanga skapast möguleikar á frekari hreinsun og hagnýtingu á jarðvarmagösunum sem skilin eru frá brennisteinsvetninu.

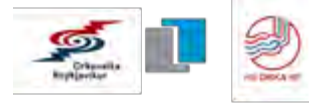
Áfangi 4, SulFix fjórði áfang., Endanleg niðurdæling á H₂S gasi frá Hellisheiðarvirkjun. Áfanginn felst í því að auka við búnaðinn sem búið er að þróa og prufukeyra í fyrri áföngum SulFix verkefnisins eins og þörf krefur. Áfanginn

⁴³ Mannvit (2012a)

⁴⁴ Ingvi Gunnarsson (2013a)

⁴⁵ Gunnar Gunnarsson (2013)

⁴⁶ Mannvit (2013)



hefst með hönnun og undirbúningi í janúar 2018 og lýkur með vöktun og mati á árangri af varanlegri niðurdælingu á H₂S gasi frá Hellsheiði í mars 2020. Gert er ráð fyrir að byggja þurfi við gasstöðina til að rúma aukin búnað.

8.2 VÖRÐUR

Í nýsköpunarverkefnum eins og þessu er nauðsynlegt að styðjast við vörður þar sem árangur er mældur og það metið hvort halda skuli verkefninu áfram á þeirri braut sem áætlað var. Vegna óhjákvæmilegrar óvissu er nauðsynlegt að vera með áætlun um það hvernig skuli bregðast við ef verkefnið stöðvast við einhverjar vörður sem settar hafa verið í upphafi verkefnisins. Eftir hvern áfanga þarf að meta hvernig til hefur tekist og bera saman við markmið verkefnisins. Áður en ákvörðun er tekin um næsta áfanga þarf að bera áform, tíma og kostnað undir stjórn OR.



- Varða 1 – SulFix lausn, samþykkt af stýrihópi.
- Varða 2 – Verkefnisáætlun samþykkt af stýrihópi.
- Varða 3 – Verkefnisáætlun afhent og kynnt fyrir UST.
- Varða 4 – Niðurstaða tilraunar á SulFix 1. áfanga kynnt.
- Varða 5– Hermun lokið og skýrsla gefin út.
- Varða 6 – Virkniprófanir og gangsetning á SulFix niðurdælingu, 15-30 % förgun.
- Varða 7 – Árangursmat af SulFix 2. áfanga.
- Varða 8 – SulFix 3. áfangi, lausn kynnt og samþykkt.
- Varða 9 – Virkniprófanir og gangsetning á SulFix 3. áfanga, 50% förgun.
- Varða 10 – Árangursmat af SulFix 3. áfanga.
- Varða 11 – Virkniprófanir og gangsetning á SulFix 4. áfanga, förgun til frambúðar.
- Varða 12 – Árangursmat af SulFix 4. áfanga, gaslosun til frambúðar.

Varða 1 – *SulFix lausn, samþykkt af stýrihópi.* Samþykki stýrihóps fyrir SulFix lausn gefur verkefnisstjóra heimild til að vinna verkefnisáætlun sem miðar að þeirri lausn. Höfnun stýrihóps gefur til kynna að leita skuli annarra lausna.

Varða 2 – *Verkefnisáætlun samþykkt af stýrihópi.* Gefur til kynna að aðföng til verkefnisins séu tryggð, þar meðtalið áætlað fjármagn og mannaflí til að hrinda áætluninni í framkvæmd og hún verður kynnt stjórnvöldum sem forsenda fyrir ósk orkufyrirtækjanna um að seinka gildistöku hertra ákvæða reglugerðar um styrk brennisteinsvetnis í andrúmslofti. Höfnun stýrihóps þýðir frestun á framkvæmd verkefnisáætlunarinnar og að hún verður ekki kynnt stjórnvöldum.

Varða 3 – *Verkefnisáætlun afhent og kynnt fyrir UST.* Jákvæð viðbrögð stjórnvalda eru túlkuð sem stuðningur við verkefnisáætlunina eins og hún er lögð fyrir. Neikvæð afgreiðsla á beiðni um frestun hertra ákvæða reglugerðar þýðir endurmat á næstu skrefum ásamt greiningu á hugsanlegum afleiðingum.

Varða 4 – *Niðurstaða tilraunar á SulFix 1. áfanga kynnt.* Jákvæð niðurstaða er forsenda þess að hefja annan áfanga SulFix niðurdælingar. Neikvæð niðurstaða gerir kröfu um endurmat og frekari tilraunir áður en hafist er handa við næsta áfanga.



Varða 5 – *Hermun lokið og skýrsla gefin út.* Hermunin gefur til kynna hvort og hvað aðferð er hagkvæmust fyrir íblöndun á gasi í niðurdælingarvatnið, ásamt því að vera forsenda áframhaldandi hönnunar á öðrum áfanga SulFix. Gefi hermunin til kynna vandkvæði á hagkvæmri aðferð til íblöndunar á gasi í niðurdælingarvatnið, þarf að leita annara lausna til förgunar á brennisteinsvetni.

Varða 6 – *Virkniprófanir og gangsetning á SulFix niðurdælingu 1 vél.* Ef ekki koma upp óviðráðanleg vandamál við gangsetningu þá hefst niðurdæling á gasi frá einni vél (ca 15-30% af gasinu) ásamt vöktun á árangri. Komi upp alvarleg vandamál þarf að leita lausna á þeim í samvinnu við framleiðendur búnaðarins. Finnist ekki lausn þarf að snúa sér að öðrum hagkvæmum lausnum sem eru til skoðunar samhliða SulFix lausninni.

Varða 7 – *Árangursmat af SulFix 2. áfangi.* Reynist árangur samkvæmt áætlun opnar það fyrir aukna niðurdælingu brennisteinsvetnis. Komi í ljós neikvæðar afleiðingar af niðurdælingunni sem ekki er hægt að vinna gegn, þarf að snúa sér að öðrum hagkvæmum lausnum sem eru til skoðunar samhliða SulFix lausninni.

Varða 8 – *SulFix 3. Áfangi, amín lausn kynnt og samþykkt.* Gangi allt að óskum í hönnun búnaðar til að aðskilja H₂S og CO₂ eins og áætlun segir til um og að teknu tilliti til tæknibúnaðar, umhverfisáhrifa og hagkvæmni, verður áfanganum hrint í framkvæmd að undangengu samþykkis stýrihóps. Komi í ljós ófyrirséðir þættir sem valda því að stýrihópur verkefnisins samþykkir ekki lausnina, þarf að snúa sér að öðrum hagkvæmum lausnum sem eru til skoðunar samhliða SulFix lausninni.

Varða 9 – *Virkniprófanir og gangsetning á SulFix 3. Áfanga, gasförgun 50%.* Ef ekki koma upp óviðráðanleg vandamál við gangsetningu á búnaði til að aðskilja H₂S og CO₂ gös, hefst niðurdæling á brennisteinsvetni frá þremur vélum (ca 50% af gasinu) ásamt vöktun á árangri.

Komi upp alvarleg vandamál þarf að leita lausna á þeim í samvinnu við framleiðendur búnaðarins. Finnist ekki lausn þarf að snúa sér að öðrum hagkvæmum lausnum sem eru til skoðunar samhliða SulFix lausninni.

Varða 10 – *Árangursmat af SulFix 3. áfanga.* Reynist árangur samkvæmt áætlun skapar það forsendur til að auka við búnaðinn og niðurdælinguna þannig að dæla megi niður brennisteinsvetni frá Hellisheiði eins og þörf krefur. Komi í ljós neikvæðar afleiðingar af niðurdælingunni sem ekki er hægt að vinna gegn, þarf að snúa sér að öðrum hagkvæmum lausnum sem eru til skoðunar samhliða SulFix lausninni.

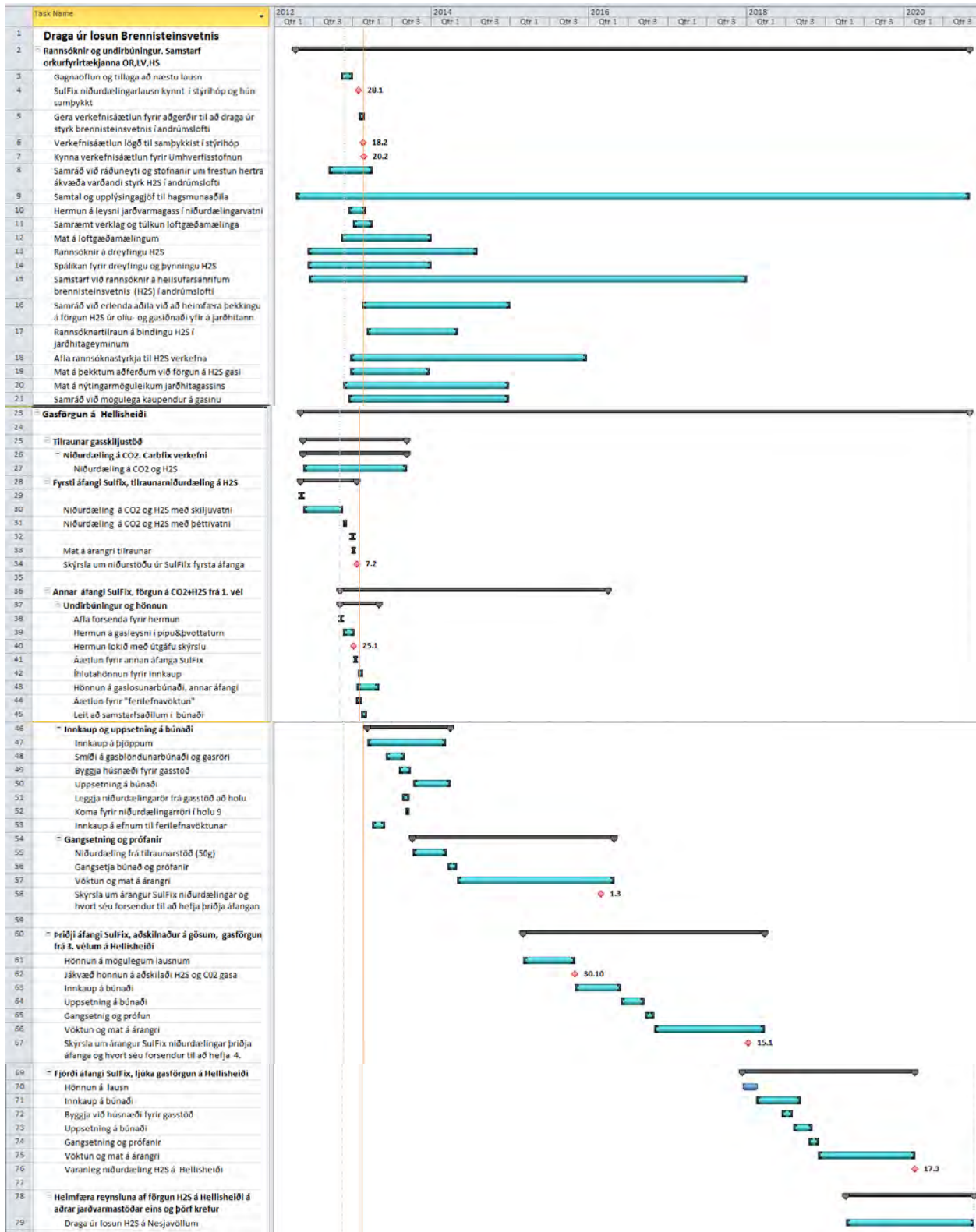
Varða 11 – *Virkniprófanir og gangsetning á SulFix 4. Áfanga, frambúðar förgun.* Ef ekki koma upp óviðráðanleg vandamál við gangsetningu á búnaði til að aðskilja öll H₂S og CO₂ gös þá hefst fullnaðarniðurdæling á brennisteinsvetni Hellisheiðarvirkjunar ásamt vöktun á árangri.

Komi upp alvarleg vandamál þarf að leita lausna á þeim í samvinnu við framleiðendur búnaðarins. Finnist ekki lausn þarf að snúa sér að öðrum hagkvæmum lausnum sem eru til skoðunar samhliða SulFix lausninni.

Varða 12 – *Árangursmat af SulFix 4. áfanga, gaslosun til frambúðar.* Reynist árangur samkvæmt áætlun er komin framtíðarlausn á förgun brennisteinsvetnis frá Hellisheiðarvirkjun sem gerir þessa lausn að varanlegri förgun brennisteinsvetnis fyrir sambærilegar jarðvarmavirkjanir. Komi í ljós neikvæðar afleiðingar af niðurdælingunni sem ekki er hægt að vinna gegn, þarf að snúa sér að öðrum hagkvæmum lausnum sem eru til skoðunar samhliða SulFix lausninni.



8.3 TÍMAÁÆTLUN

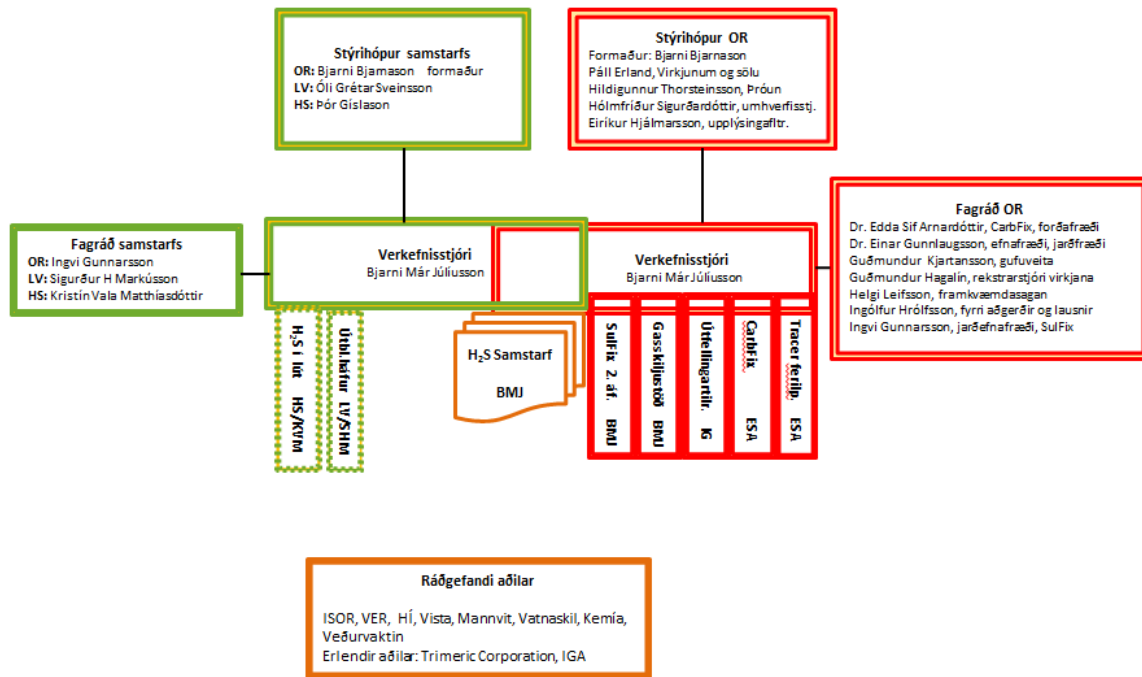


9 STJÓRNSKIPULAG

Eigendur verkefnisins eru forstjórar orkufyrirtækjanna þriggja og starfar stýrihópurinn í umboði þeirra. Stýrihópurinn réð verkefnisstjóra sem heyrir beint undir hann. Verkefnisstjóri vinnur tíma- og kostnaðaráætlun og leggur hana fyrir stýrihóp til samþykktar. Í samþykktari áætlun felst samþykki aðildarfyrirtækjanna á aðgengi verkefnisstjóra að vinnu þess starfsfólks fyrirtækjanna sem skipar verkefnishóp verkefnisins. Verkefnisstjóri annast daglegan rekstur og skipulag verkefnisins og stýrir einstökum verkþáttum eða felur það öðrum eftir atvikum.⁴⁷

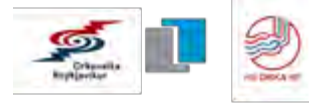
Í ljósi þess að lausn brennisteinsvandans er brýnust hjá Orkuveitu Reykjavíkur af fyrirtækjunum þremur, liggur meginþungi framkvæmdar verkefnisins þar. Verkefnisstjóri starfar að hluta í samstarfsverkefninu og að hluta hjá Orkuveitunni. Bjarni Már Júlíusson, verkefnisstjóri hefur aðsetur hjá Orkuveitu Reykjavíkur. Þessu er nánar lýst á Mynd 4 Stjórnskipulag brennisteinsvetnisverkefnisins.

Brennisteinsvetnis verkefni stjórnskipulag



MYND 4 STJÓRNSKIPULAG BRENNISTEINSVETNISVERKEFNISINS

⁴⁷ Bjarni Bjarnason, Ragna Árnadóttir og Júlíus Jónsson (2012). *Erindisbréf – Brennisteinsvetni - H₂S frá jarðgufuvirkjunum*



10 SAMSKIPTI OG SAMSKIPTALEIÐIR

10.1 UMRÆÐA SÍÐUSTU ÁR

Frá því að umræða um brennisteinsvetni í andrúmslofti hófst að verulegu marki hér á landi, síðla árs 2006, hafa starfsmenn Orkuveitu Reykjavíkur tekið þátt í opinberri umræðu um viðfangsefnið og leitast við að kynna sjónarmið fyrirtækisins í ljósi þeirra staðreynda sem fyrir hafa legið á hverjum tíma. Sérstakt átak var gert í að kynna stöðuna frá því um áramótin 2011-2012 og fram á mitt ár. Á þessu tímabili átti umhverfisstjóri OR þessa fundi með hagsmunaaðilum:

- Heilbrigðisnefnd Suðurlands, 9. desember 2012.
- Umhverfisstofnun, 20. desember 2011.
- Vinnueftirlit ríkisins, 6. janúar 2012.
- Bæjarstjórn Hveragerðis, 12. janúar 2012.
- Fulltrúar Landsvirkjunar og HS-Orku, 12. janúar 2012.
- Stjórn Orkuveitu Reykjavíkur, 20. janúar 2012.
- Heilbrigðiseftirlit Suðurlands, 31. janúar 2012.
- Umhverfisstofnun, 1. febrúar 2012.
- Sveitarfélagið Ölfus, 6. febrúar 2012.
- Málstofa með þátttöku fulltrúa frá Landsvirkjun, HS Orku og verkfræðistofunni Mannviti, 9. mars 2012.
- Heilbrigðiseftirlit Reykjavíkur, 26. apríl 2012.
- Grímsnes- og Grafningshreppur, 3. maí 2012.
- Heilbrigðiseftirlit Hafnarfjarðar- og Kópavogs, 3. maí 2012.
- Heilbrigðiseftirlit Kjósarsvæðis, 3. maí 2012.
- Formlegt samstarf OR, Landsvirkjunar og HS-Orku um lausnir á útblástursmálum jarðvarmavirkjana 9. maí 2012.
- Umhverfisráðuneyti, 31. maí 2012.

1. júní 2012 var haldið fjölsótt málþing með helstu sérfræðingum landsins, þar sem afrakstur þessa samráðs var kynntur, staða verkefna OR um brennisteinsvetnið og samkomulag orkufyrirtækjanna þriggja á þessu sviði.

Á opnum árfundi Orkuveitu Reykjavíkur 14. júní 2012, þar sem fulltrúum fjölmiðla var boðið, var ítarleg grein gerð fyrir stöðu mála og spunnust í framhaldinu nokkrar opinberar umræður um hana.

Brennisteinsvetnismál skipuðu einnig stóran sess á fundi með fulltrúum allra heilbrigðiseftirlita á starfssvæði Orkuveitu Reykjavíkur sem umhverfisstjóri OR boðaði til 8. febrúar 2013. Á honum voru kynnt drög að Umhverfisskýrslu OR fyrir árið 2012, þar sem brennisteinsvetnismál voru kynnt sem stærsta umhverfisverkefni sem OR glímir nú við.

Á vef Orkuveitu Reykjavíkur er þegar að finna upplýsingasíðu um brennisteinsvetni í andrúmslofti (spurningar og svör) auk rauntímamælinga á styrk brennisteinsvetnis í andrúmslofti.

Hér er látin ótalin kynning sem CarbFix-verkefnið hefur fengið, en vísindalegar niðurstöður þess eru forsendur þess að ráðist var í þróun þeirrar lausnar á brennisteinsvetnismálum sem verkefnið snýst um.

10.2 HAGSMUNAADILAR

Sú fundaröð sem rakin er hér að ofan varpar ljósi á niðurstöðu þeirra hagsmunaaðilagreininga sem gerðar hafa verið vegna verkefnisins. Stjórnvöld – ráðuneyti, Umhverfisstofnun og heilbrigðiseftirlit sveitarfélaga skipa þar veigamikinn sess. Sömuleiðis sveitarstjórnir sem gæslumenn almannahagsmuna innan viðkomandi lögsagnarumdæma, en einnig:

- a) Almennitur, milliliðalaust.
- b) Orkustofnun.
- c) Náttúruverndarsamtök.
- d) Atvinnu- og nýsköpunarráðuneyti.
- e) Vinnueftirlit ríkisins.
- f) Vísindasamfélagið hér á landi og erlendis.
- g) Starfsmenn orkufyrirtækja og virkjana sérstaklega.
- h) Hugsanlegir kaupendur jarðhitagasa.
- i) Hugsanlegir fjárfestar í atvinnurekstri í grennd við virkjanir.

10.3 SAMSKIPTALEIÐIR

Þau tæki sem einkum verða nýtt í verkefninu til samskipta við hagsmunaaðila eru þessi:

- a) Skýrslur til stjórnvalda um framgang.
- b) Upplýsinga- og samráðsfundir með stjórnvöldum.
- c) Opnir upplýsinga- og samráðfundir.
- d) Ytri vefur m.a. með upplýsingum um:
 - a. brennisteinsvetni í andrúmslofti.
 - b. loftgæðamælingar í rauntíma.
- c. framvindu verkefnisins.
- e) Birting vísindagreina.
- f) Innri samskiptaleiðir.
 - a. verkefnisvefur.
 - b. stýrihópsfundir.
 - c. fagráðsfundir.

Auk ofangreindra samskiptaleiða verður lagt kapp á það, meðan á verkefninu stendur, að veita hverjum sem eftir leitar sem gleggstar upplýsingar um stöðu þess og framgang og fundað með stjórnvöldum eftir því sem þau óska.

11 LOKAORÐ

Búnaður til að draga úr styrk brennisteinsvetnis á iðnaðarskala verður ekki fullbúinn þegar hert mörk í reglugerð nr. 514/2010 ganga í gildi 1. júlí 2014.

Virki búnaður SulFix niðurdælingarlausnar með viðunandi hætti er raunhæft að áætla að fullnægjandi lausn á útblæstri H_2S frá virkjuninni verði komin í varanlegan rekstur í árslok 2019. Þangað til verður dregið úr losun brennisteinsvetnis í áföngum og vænst er 15-30% minnkun útstreymis strax á fyrsta ársfjórungi næsta árs. Vert er að geta þess að hér er um nýsköpunar- og þróunarverkefni að ræða sem mun færa neytendum hagkvæma og umhverfisvæna lausn, ef vel tekst til. Hins vegar er talsverð óvissa þegar farnar eru ótroðnar slóðir og það tekur tíma að þróa lausnina til enda. Það er dýrt að koma upp búnaði sem losar virkjunina við útblástur brennisteinsvetnis, þó mögulega megi hafa af því einhverjar tekjur í framtíðinni. Umfang og mikilvægi verkefnisins er þannig að framvindu og ákvarðanir um hvern áfanga þarf að bera undir eigendur, stýrihóp eða stjórn fyrirtækisins eftir atvikum.

Það er vandfundin umhverfisvænni lausn en SulFix, með henni er verið að nota náttúruleg ferli til að binda H_2S í jarðhitakerfinu. Þetta eru sömu ferli og eru að störfum í jarðhitakerfum í dag. Lausnin er því í stuttu máli að dæla brennisteinsvetninu aftur ofan í jarðhitakerfið þaðan sem það kom og nota, til að binda það aftur í kerfinu, sömu náttúrulegu ferlin og eru nú þegar til staðar í því.

Auk þess að dæla brennisteinsvetninu beint niður í jarðhitageyminn, þá er verið að gera tilraun með að blanda því við skiljuvatnið til að hindar kísilútfellingar úr því og minka þannig rekstrarvanda á niðurdælingarveitunni.



12 HEIMILDASKRÁ

Andri Stefánsson, Stefán Arnórsson, Ingvi Gunnarsson, Hanna Kaasalainen (2009). *Förgun brennisteinsvetnis frá Hellisheiðarvirkjun Jarðefnafræðileg athugun*. Orkuveita Reykjavíkur (35)

Andri Stefánsson, Stefán Arnórsson, Ingvi Gunnarsson, Hanna Kaasalainen, Einar Gunnlaugsson (2011). The Geochemistry and sequestration of H₂S into the Geothermal system at Hellisheidi, Iceland. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 202 (2011) 179–188 (36)

Auður A. Óladóttir, Daði Þorbjörnsson, Guðmundur H. Guðfinnsson, Halldór Ármannsson, Magnús Á. Sigurgeirsson, Þráinn Friðriksson (2011). *Review of the Fate of H₂S from Geothermal Power Plants, Environmental Effects and Techniques for H₂S Removal*. Reykjavík: ÍSOR (29)

Bergur Sigfússon o.fl. (2011). *Staða tilraunaverkefna á gasaðskilnaði og niðurdælingu við Hellisheiðarvirkjun*, Minnisblað OR frá mars 2011 (6)

Bergur Sigfússon, Ingvi Gunnarsson (2011). *Scaling Prevention Experiments in the Hellisheidi Power Plant, Iceland*. Proceedings, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford California, January 31 – February 2, 2011. (41)

Bjarni Bjarnason, Ragna Árnadóttir og Júlíus Jónsson (2012). *Erindisbréf – Brennisteinsvetni, H₂S frá jarðgufuvirkjunum* (27,47)

Bjarni Már Júlíusson (2013). *Gaslosun jarðvarmavirkjana*. Minnisblað SulFix verkefni frá febrúar 2013. (2)

CarbFix (2013). Skoðað 15. febrúar 2013. <http://www.or.is/English/Projects/CarbFix/> (4)

Edda Sif Aradóttir, Ingvi Gunnarsson, Bergur Sigfússon, Gunnar Gunnarsson, Einar Gunnlaugsson, Hólmfríður Sigurðardóttir, Einar Jón Ásbjörnsson og Eric Sonnenthal. *Towards Cleaner Geothermal Energy Utilization: Capturing and Sequestering CO₂ and H₂S Emissions from geothermal Power Plants*. Proceedings TOUGH Symposium 2012. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California, September 17-19, 2012 (34)

Edda Sif Aradóttir (2013a). *Ferilefnaprófanir á Hellisheiði*. Minnisblað OR frá 11. febrúar 2013 (42)

Edda Sif Aradóttir (2013b). *CarbFix tilraunaverkefnið*. Minnisblað OR frá 13. febrúar 2013. (5)

Gunnar Gunnarsson (2013). *Dælu tilraun í holu HE-08*. Minnisblað OR frá 15. febrúar 2013 (11,45)

Gústaf Adolf Skúlason (2010). *Drög að reglugerð um styrk brennisteinsvetnis*. Bréf frá Samorku sent Umhverfissráðuneytinu 26. mars 2010 (14)

Hanne Krage Carlsen, Helga Zoëga, Unnur Valdimarsdóttir, Þórarinn Gíslason, Birgir Hrafnkelsson (2012). Hydrogen sulfide and particle matter levels associated with increased dispensing of anti-asthma drugs in Iceland's capital. *Environmental Research*, Vol. 113 (2012) 33-39.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935111002866> (22)

Hildur Ingvarsdóttir (2012). *Rannsóknir og eftirlit á heilsufari starfsmanna virkjanna vegna H₂S*. Minnisblað OR frá mars 2012 (26)



Hjalti Sigurjónsson, Jean-Claude C. Berthet, Sveinn Óli Pálmason (2012). *Dreifing brennisteinssvæðis frá Hellisheiðarvirkjun úr háfum. Forathugun gagnvart virkni við ríkjandi veðuraðstæður*. Reykjavík: Verkfræðistofan Vatnaskil fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. (31)

Hjörleifur B. Kvaran og Hólmfríður Sigurðardóttir (2009). *Athugasemdir Orkuveitu Reykjavíkur við drög að reglugerð um styrk brennisteinssvæðis*. Bréf OR sent Umhverfisstofnun 18. desember 2009 (13)

Hólmfríður Sigurðardóttir (2013). *Útstreymi brennisteinssvæðis frá Nesjavallavirkjun og Hellisheiðarvirkjun. Umhverfisskýrsla OR 2012* (kemur út í apríl 2013) (1)

Ingólfur Hrólfsson (2010). *Greinargerð um gasskiljustöð*. Minnisblað OR frá maí 2010 (8)

Ingvi Gunnarsson, Bergur Sigfússon, Andri Stefánsson, Stefán Arnórsson, Samuel Warren Scott, Einar Gunnlaugsson (2011). *Injection of H₂S from Hellisheiði Power Plant, Iceland*. Proceedings, Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford California, January 31 – February 2, 2011. (33)

Ingvi Gunnarsson (2013a). *SulFix Tilraunaniðurdæling, samantekt*. Minnisblað OR frá 7 febrúar 2013. (10)(44)

Ingvi Gunnarsson (2013b). *Jarðhitagas sem útfellingavörn kísils*. Minnisblað OR frá 8. Febrúar 2013 (40)

Kristinn Tómasson og Friðrik Daníelsson (2010). *Brennisteinssvæði og vinnuvernd*. Skoðað 15. Febrúar 2013 á vef Vinnueftirlitsins. http://www.vinnueftirlit.is/vinnueftirlit/upload/files/efna-storslysavarnir/brennisteinssvæði_og_vinnuvernd.pdf (16)

Kristín Vala Matthíasdóttir (2013). *Förgun H₂S með vítissóða*. Minnisblað HS Orku frá 12. febrúar 2013 (32)

Magnús Þór Arnarson (2011) *Stöðuskýrsla vegna gasskiljustöðvar*. Mannvit. (9)

Mamrosh, D., McIntush, K., Beitler, C., Sigurður H. Markússon, Kristján Einarsson (2012). *Screening of H₂S Abatement options for Geothermal Power Noncondensable Gas at Bjarnarflag*. (39)

Mannvit (2011). *Brennisteinssvæði: Hreinsiaðferðir fyrir 90MW virkjunaráfanga á Hengillssvæðinu*. Skýrsla fyrir OR (30)

Mannvit (2012a). *Samanburður skiljunaraðferða: Vatnspvottur og eiming eða sértækir leysar*. Minnisblað frá 12. Október 2012 (43)

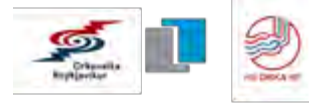
Mannvit (2012b). *Hreinsun brennisteinssvæðis*. Kynning í desember 2012 (28, 38)

Mannvit (2013), *Hermun á leysni jarðgass í niðurdælingarvatnið*, febrúar 2013. Skýrsla unnin fyrir SulFix 2. Áfanga (46)

Reglugerð um styrk brennisteinssvæðis (H₂S) í andrúmslofti. nr. 514/2010. <http://www.reglugerð.is/interpro/dkm/WebGuard.nsf/key2/514-2010> (12)

SAVOLAINEN, H. 1982. Nordiska expertgruppen för gränsvärdesdokumentation. 40. Dihydrogensulfid [Nordic expert group for TLV evaluation. 40. Hydrogen sulfide]. *Arbeta och hälsa*, 31: 1–27 (1982). https://gupea.ub.gu.se/bitstream/2077/4027/1/ah1982_31.pdf (21)

Sheldon Roth and Verona Goodwin (2003). *Health Effects of Hydrogen Sulphide: Knowledge Gaps*. <http://environment.gov.ab.ca/info/library/6708.pdf> (17)



Sigurður H. Markússon (2013), sérfræðingur hjá Landsvirkjun. *Rannsóknir á bindingu brennisteinsvetnis í bergi með hvarfakút*. Minnisblað frá 9. janúar 2013 (37)

Snjólaug Ólafsdóttir (2013). *Örlög brennisteinsvetnis*, kynning á doktorsverkefni í febrúar 2013. (23)

VGK (2000). *Nesjavallavirkjun Áfangi 4B, stækkun rafstöðvar úr 76 í 90 MW: Mat á umhverfisáhrifum*. Skýrsla unnin fyrir OR í október 2000 (3)

VGK-Hönnun (2007). *Hreinsun brennisteinsvetnis frá jarðgufuvirkjun Orkuveitu Reykjavíkur á Hengilssvæðinu*. Skýrsla unnin fyrir Orkuveitu Reykjavíkur. (7)

WHO (2000). *Air quality guidelines for Europe, 2nd ed.* Copenhagen, World Health Organization Regional Publications, European Series: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf (20)

WHO (2003). *Hydrogen Sulfide. Human effects. Concise International Chemical Assessment Document 53.* (18)(22) <http://www.who.int/ipcs/publications/cicad/en/cicad53.pdf> (15,19)

Þór Tómasson (2012). *Minnisblað um heilsufarsmörk brennisteinsvetnis*. Minnisblað Mannvits frá mars 2012. (18)

Þórarinn Gíslason (2012). *Mat á heilsufarsáhrifum H₂S*. Bréf Læknadeildar HÍ sent OR 30 mars 2012 (25)

Þröstur Þorsteinsson (á.á.). *Dreifing H₂S mengunar á höfuðborgarsvæðinu*. Kynning á verkefni fyrir OR (24)