

FYRIRSPURN

DAGS.

14.05.2024

MÁLEFNI

Fyrirspurn um álit utanríkisráðuneytisins til tilraunar með losun sporefna í Hvalfirði á vegum Rastar sjávarrannsóknaseturs í júlí 2024. Tilraunin er gerð í samstarfi við [C]Worthy og Carbon to Sea Initiative.

SENDANDI

Salome Hallfreðsdóttir (Röst)
Halla Kristjánsdóttir (EFLA)

DREIFING

Almennt netfang utn@utn.is (utanríkisráðuneyti)
Birgir Hrafn Búason birgir.buason@utn.is (utanríkisráðuneyti)
Afrít sent á Huga Ólafsson hugi.olafsson@urn.is (umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneyti)

Samantekt

Röst sjávarrannsóknasetur, í samstarfi við [C]Worthy og Carbon to Sea Initiative, stefnir á að framkvæma rannsókn á aukningu basavirkni sjávar í Hvalfirði sumarið 2025. Fyrsti áfangi rannsóknarinnar felst í tilraun með losun sporefna sumarið 2024. Í þessu skjali er fyrsta áfangi rannsóknarinnar lýst og óskað eftir áliti utanríkisráðuneytisins. Sótt verður um rannsóknarleyfi fyrir basarannsókninni 2025 í lok sumars 2024.

Efnisyfirlit

1 INNGANGUR	3
1.1 Aðilar sem taka þátt	4
2 TILLAGA AÐ ÁFANGASKIPTU TILRAUNAVERKEFNI	5
3 NÁNARI LÝSING Á 1. ÁFANGA: LOSUN Á SPOREFNUNUM $^3\text{He}/\text{SF}_6$	7
3.1 Bakgrunnur	7
3.2 Aðferð við tvöfalda sporefnið $^3\text{He}/\text{SF}_6$	7
3.3 Dæling á $^3\text{He}/\text{SF}_6$	8
4 MÆLIÐFERÐIR Í 1. ÁFANGA	10
4.1 Sýnataka og mælingar	10
Aðferðir við mælingu sporefna og sýnatöku	10
5 MIKILVÆGAR UPPLÝSINGAR UM EFNIN SEM NOTUÐ VERÐA Í 1. ÁFANGA	12
6 ÁLIT UTANRÍKISRÁÐUNEYTISINS	13
VIÐHENGI: LJÓSMYNDAGÖGN UM FYRRI LOSUN Á $^3\text{He}/\text{SF}_6$	14
HEIMILDASKRÁ	16

1 Inngangur

Röst sjávarrannsóknasetur¹ í samstarfi við Carbon to Sea Initiative² og [C]Worthy³ hyggja á að framkvæma rannsókn og tilraunir á möguleikum aukinnar basavirkni hafsins sem aðferð til að fjarlægja koldíoxíð úr andrúmsloftinu (e. marine carbon dioxide removal, mCDR). Röst sjávarrannsóknasetur er nýstofnað íslenskt rannsóknar- og þróunarfélag og er hluti af alþjóðlegu neti rannsóknarstöðvar undir hatti Carbon to Sea Initiative. Carbon to Sea Initiative er óhagnaðardrifið bandarískt sjálfseignastofnun sem m.a. fjármagnar alþjóðlegt net rannsóknastöðva á sviði loftslagsmála í því skyni að hýsa rannsóknir á vísindalegum, tæknilegum og samfélagslegum fýsileika þess að auka basavirkni hafsins. [C]Worthy er óhagnaðardrifið bandarískt rannsóknar- og þróunarfélag sem vinnur að þróun á reiknilíkönum sem eru opinn hugbúnaður til að styðja við rannsóknir á möguleikum aukinnar basavirkni í hafi. Saman mynda þessir aðilar rannsóknarteymið sem stendur að baki þessari rannsókn og tilraunum (sjá nánar yfirlit yfir alla aðila rannsóknarteymisins í tafla 1).

Aðferðin felur í sér að auka basavirkni hafsins til að fjarlægja umfram koldíoxíð úr andrúmsloftinu og geyma varanlega á stöðugu formi, þ.e. bíkarbónati, sem er þegar til staðar í miklu magni í úthöfunum. Aðferðin við að fjarlægja koldíoxíð gerist í tveimur þrepum: 1) Fyrst er basavirkni við yfirborð sjávar aukin, 2) sem leiðir til loftskipta milli andrúmslofts og sjávar þar til ný jafnvægisstaða næst.

Hafefnafræðin að baki þessari aðferð hefur verið rannsökuð í þaula og þekkingin er til staðar, en sýna þarf fram á virkni þeirra tæknilegu aðferða sem hægt er að beita til að hafa áhrif á basavirkni, staðfesta breytingar sem af hljótast og meta umhverfisáhrif aðferðarinnar með tilraunum við raunverulegar aðstæður á hafi úti til þess að marka stefnu um þróun á þessari aðferð til að fjarlægja koldíoxíð úr andrúmslofti [1], [2], [3].

Vorið 2023 vann EFLA staðarvalsgreiningu fyrir mögulegt rannsóknarverkefni á þessu sviði á Íslandi. Í þeirri greiningu voru nokkur álitleg svæði umhverfis Ísland vegin og metin út frá félagslegum, umhverfislegum og eðlisfræðilegum þáttum og hversu vel þau þóttu henta til kolefnisbindingar í sjó [4]. Þeirra á meðal var Hvalfjörður en hann þykir henta vel til verkefnisins, fyrst og fremst vegna hentugar vegalengdar frá Reykjavík og góðra innviða, en einnig vegna þess að sjókvíaelði er ekki heimilt í firðinum og að engin jökulá rennur í fjörðinn. Hafnir eru til staðar, annars vegar á Akranesi og hins vegar á Grundartanga. Eðlisfræðilegir eiginleikar sjávar svo sem selta, hitastig og endurnýjunartími þykja einnig hentug á þessu svæði.

Áður en rannsóknir á aukningu basavirkni sjávars geta hafist er nauðsynlegt að meta eðliseiginleika fjarðarins og að leggja meginlegt mat á loftskipti andrúmslofts og sjávar, sem er mikilvægt ferli fyrir mögulega fjarlægingu koldíoxíðs fyrir tilstilli aukinnar basavirkni í hafi. Þessi 1. áfangi rannsóknarinnar felst í losun tveggja vistfræðilega skaðlausra sporlofttegunda, ³He og SF₆, og vöktun á hreyfingum þeirra innan fjarðarins. Enn fremur myndi slík rannsókn veita upplýsingar til að greina hvernig efni í firðinum dreifast og þynnast með tímanum. Gögnin munu dýpka vísindalegan skilning á flæði innan fjarðarins og gera rannsóknarteyminu kleift að sannreyna reiknilíkan sem hermir haffræðilega og hafefnafræðilega ferla í Hvalfirði. Þessi mikilvægu gögn munu aðstoða við að hönnun næstu áfanga rannsóknarinnar. Gögnin munu einnig verða aðgengileg

¹ [Röst sjávarrannsóknasetur](#)

² [Carbon to Sea Initiative](#)

³ [\[C\]Worthy](#)

íslenskum vísindamönnum fyrir þeirra eigin greiningar, en allar niðurstöður sem koma úr þessum tilraunum verða gerðar aðgengilegar á opnum vísindagagnagrunnum.

Á næstu árum gætu rannsóknir í Hvalfirði styrkt þann vísindalega grunn sem þarf til að færa sönnur á gildi aukinnar basavirkni hafins sem raunhæfrar aðferðar til að draga úr áhrifum loftslagsbreytinga. Enn fremur vill rannsóknarteymið efla innlent vísindastarf svo hægt sé að halda áfram sjálfstæðum rannsóknum á aukningu basavirkni í hafi og lífjarðefnafræðilegum rannsóknum í hafi við Ísland.

1.1 Aðilar sem taka þátt

Yfirlit yfir aðila rannsóknarteymisins og hlutverk þeirra má sjá í eftirfarandi töflu:

TAFLA 1 Yfirlit yfir aðila sem taka þátt í rannsókninni og mynda rannsóknarteymið.

	Nafn	Starfsheiti	Stofnun/félag	Hlutverk/sérsvið	Samskiptaupplýsingar
Stjórnun á tilraunastað	Salome Hallfreðsdóttir	Framkvæmdastjóri	Röst sjávar-rannsóknasetur	Vettvangs-rannsóknastöð	salome@rostrannso knir.is
	Irene Polnyi	Stjórnar-formaður Rastar	Forstöðumaður vettvangsrannsókna hjá Carbon to Sea Initiative	Uppbygging vettvangsrannsóknastöðva	irene@carbontosea. org
Stjórnandi verkefnis	Dr. David Ho	Vísindastjóri	[C]Worthy	Lífjarðefnafræðilegar athuganir í hafi	david@cworthy.org
Sporefnis- og kolefnisvöktun í hafi	Dr. David Ho	Vísindastjóri	[C]Worthy	Lífjarðefnafræðilegar athuganir í hafi	
	Dr. Toby Koffman	Vísindamaður	[C]Worthy	Lífjarðefnafræðilegar athuganir í hafi	toby@cworthy.org
Gangavísindi og líkanagerð	Dr. Ulla Heede	Vísindamaður	[C]Worthy	Lífjarðefnafræðileg líkanagerð í hafi	ulla@cworthy.org
	Dr. Matt Long	Framkvæmdastjóri	[C]Worthy	Lífjarðefnafræðileg líkanagerð í hafi	matt@cworthy.org
	Dr. Alicia Karspeck	Tæknistjóri	[C]Worthy	Lífjarðefnafræðileg líkanagerð í hafi	aliciak@cworthy.org
Eftirlit með upphafsgildum	Sólveig Rósa Ólafsdóttir	Vísindamaður	Hafrannsóknastofnun	Hafefnafræðingur	solveig.rosa.olafsdot tir@hafogvatn.is
Skipulag og aðgerðir	Jón Heiðar Ríkhartsson	Skipulagsstjóri	EFLA verkfræðistofa	Vélaverkfræði, verkefnastjórnun	jon.heidar.rikhardss on@efla.is

2 Tillaga að áfangaskiptu tilraunaverkefni

Rannsóknin er áfangaskipt. Markmiðið með áfangaskiptingunni er að tryggja að rannsóknarteymið geti framkvæmt basavirknitylraunina á öruggan og árangursríkan hátt frá vísindalegu og umhverfislegu sjónarmiði. Fyrirhuguðu rannsóknaráfangarnir fjórir eru studdir viðtækum haf- og vistfræðilegum grunnögnum sem Hafrannsóknastofnun aflar frá mars 2024 til mars 2025 [5]. Áfangaskiptingunni er einnig lýst á mynd 1.

1. áfangi: $^3\text{He}/\text{SF}_6$ tvöfalt sporefni (umfjöllunarefni þessa skjals)

Fyrirhugað í júlí 2024

Rannsóknarteymið leggur til að gerð verði tilraun með tvö sporefni (^3He og SF_6) í júlí 2024 til að þróa meginlegt mat á loftskiptum koldíoxíðs milli andrúmslofts og sjávar þ.m.t. hraða loftskiptanna og láréttri dreifingu í Hvalfirði. Þetta er mikilvægt skref í kortlagningu á rannsóknarstaðnum. Ásamt því að veita grunnupplýsingar myndu gögnin veita samhengi fyrir bæði staðfestingu líkana og frekari vettvangsrannsóknir í firðinum. ^3He og SF_6 eru líffræðilega óvirkar lofttegundir og ógna því ekki vistkerfum. Fjallað er nánar um þennan áfanga í næsta kafla.

2. áfangi: Líffræðilegt áhættumat

Tillaga að framkvæmd veturinn 2024/2025

Auk tilraunarinnar með losun tveggja sporefna leggur rannsóknarteymið til umhverfisvöktun með alhliða líffræðilegu áhættumati fyrir og á meðan rannsókninni stendur. Þetta felur í sér að taka saman allar fyrirliggjandi upplýsingar um lífríki fjarðarins og nota svo reiknilíkön til að meta þau hámarksfrávik frá efnafræðilegu grunnástandi sem vænta má frá tilrauninni með losun basa í fjörðinn og með því að gera tilraunir á rannsóknarstofum til að greina líffræðilega næmni bæði einstakra tegunda og vistkerfisins. Allt þetta yrði svo lagt til grundvallar vöktunar á líffræðilegum þáttum í rannsóknaráföngunum sumarið 2025.

3. áfangi: Losun á ródamín-litarefni

Tillaga að framkvæmd í júlí 2025

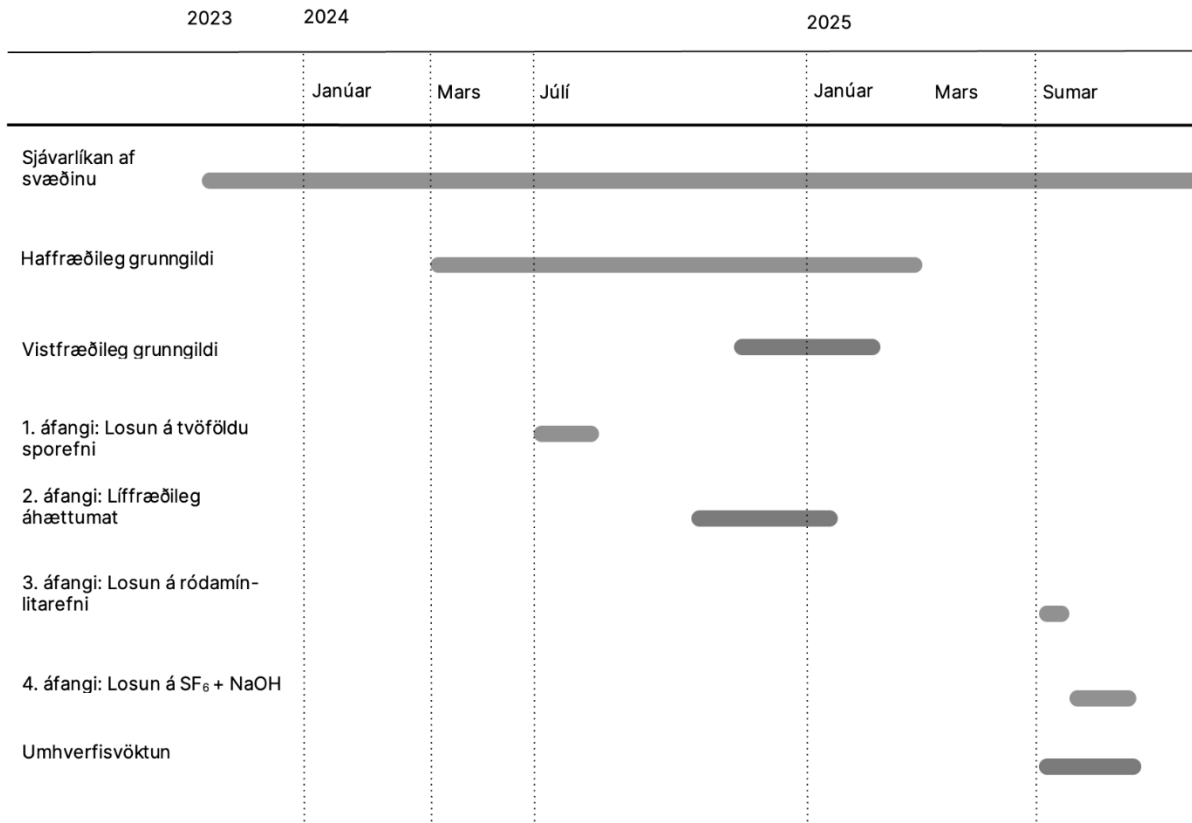
Tilraun með aukningu basavirkni felur í sér að dreifa natríumhýdroxíði (NaOH) aftan úr skipi (4. áfangi). Tilgangurinn með því að notast við skip til dreifingar er að dreifa þessu efni í nægilega miklu rúmmáli af sjó til að þynna basavirkni þess hratt og koma í veg fyrir mikið og viðvarandi pH-frávik. Áður en NaOH verður dreift í raun ætla rannsóknarteymið að líkja eftir aðferðinni með því að nota vistfræðilega skaðlaust ródamín-litarefni. Mælingar á þessu sporlitarefni í hafinu fyrir aftan skipið verða notaðar til að kvarða empirísk líkön sem lýsa þynningarhraða í kjölfari skipsins og gera okkur þannig kleift að ákvarða nákvæmlega þann hraða NaOH -dælingar sem þarf til að viðhalda öruggum pH-mörkum. Þar sem ródamín-litarefni er sýnilegt með berum augum myndi þessi losun einnig veita rannsóknarteyminu innsæi til að stýra losun og sýnatöku natríumhýdroxíðsins.

4. áfangi: Losun SF_6 + NaOH

Tillaga fyrir júlí 2025

Eftir að hafa notað gögn úr losun á ródamín-litarefni til að kvarða líkanið sem lýsir því dreifingu og því sem gerist fyrir aftan skipið vonumst við til að losa natríumhýdroxíð út í fjörðinn (til að hafa áhrif á basavirkni) og fylgjast með lífjarðefnafræðilegum breytingum sem af því hljóttast með því gera mælingar frá rannsóknaskipi sem útbúið verður til sýnasöfnunar og mælinga á karbónatkerfi sjávarins. Rannsóknarteymið mun einnig

fylgjast með hugsanlegum umhverfisáhrifum og líffræðilegum áhrifum. Þar sem magn alkalíseraðs sjávar væri ekki sýnilegt ætlar rannsóknarteymið að losa sporlofttegundina SF₆ ásamt natríumhýdroxíðinu. Gasgreini til að mæla SF₆ í firðinum verður komið fyrir í rannsóknaskipinu. Þetta gerir okkur kleift að mæla hve stórt svæði í firðinum verður fyrir áhrifum af breytingunni á sýrustigi. Tekið skal fram að rannsóknarteymið áformar aðskilið ferli vegna leyfisveitingar fyrir þennan áfanga þ.e. losunar á natríumhýdroxíði og SF₆ (brennisteinshexaflúoríði) sumarið 2025 og rannsóknir á áhrifum þess.



MYND 1 Yfirlit yfir fyrirhugaða rannsóknaráfanga í Hvalfirði. Blár litur táknar líffræðilegar rannsóknir og vöktun.

3 Nánari lýsing á 1. áfanga: Losun á sporefnum $^3\text{He}/\text{SF}_6$

3.1 Bakgrunnur

Til að meta möguleika þess að auka basavirkni í Hvalfirði hefur [C]Worthy þróað nákvæmt eðlis- og lífjarðefnafræðilegt líkan af rannsóknarsvæðinu. Einna mikilvægustu upplýsingarnar sem líkanið þarf til að ákvarða virkni aukningar á basavirkni í hafi er hraði loftskipta milli andrúmslofts og sjávar, sem stjórnar því hversu hratt alkalíseraður sjór getur fjarlæggt koldíoxíð úr andrúmsloftinu. Til að aukning á basavirkni sé árangursrík þarf upptaka koldíoxíðs að eiga sér stað áður en vatnsmassinn sekkur og útilokar snertingu milli andrúmsloftsins og alkalíseraða sjávarins. Hraði loftskipta milli andrúmslofts og sjávar stjórnast að mestu af vindhraða, með hraðari skiptum í sterkari vindi, en áhrif vindhraða eru einnig breytileg eftir stærð eða lengd þess hafflatar sem vindurinn getur blásið yfir (e. fetch) og styrk yfirborðsvirkra efna. Þar lengd þess hafflatar sem vindurinn getur ferðast yfir er takmakað og styrkur yfirborðsvirkra er breytilegri í strandsjó [heldur en lengra frá landi] getur hraði loftskipta nærri landi verið háður vindstyrk með öðrum hætti en gerist á opnu hafi. Af þessum sökum myndi 1. áfangi rannsóknarinnar ákvarða áhrif vindhraða á loftskipti milli andrúmslofts og sjávar í Hvalfirði. Til viðbótar við áhrif vindhraða myndi tilraunin með sporefni tvö skila nákvæmri mælingu á viðstöðutíma sjávar í firðinum.

Frá 7. júlí til 27. júlí 2024 (nánar tiltekið í 14 daga innan þess tímabils) leggur rannsóknarteymið til að gerð verði tilraun með losun sporefna $^3\text{He}/\text{SF}_6$ með það að markmiði að

- ákvarða hraða loftskipta og hversu háð þau eru vindhraða, sem eru tengsl sem rannsóknarteymið væntar að séu frábrugðin þeim sem eru á opnu hafi; og
- mæla dreifingu sporefnisins fyrir tilstilli hreyfinga sjávar og blöndunar í firðinum og að nota þessi gögn sem próf fyrir reiknilíkönin sem [C]Worthy keyrir.

Síðastliðna þrjá áratugi hefur sporefnaækni með $^3\text{He}/\text{SF}_6$ verið notuð í tilraunum á hafi úti og við ströndina, auk vatna, áa og ármynna um allan heim (t.d. í Norðursjó, Georges Bank, Florida Shelf, Norður-Atlantshaf, Suðurhafi, Eystrasalti, Labradorhafi, Hudson-ánni, Shark River (í Flórída), Flórídaflóa og Sutherland Pond). Þar sem ^3He og SF_6 eru vistfræðilega skaðlausar lofttegundir sem eru aðeins notaðar í örlytlu magni hafa aldrei verið gerðar athugasemdir við notkun þessara efna. Slíkar tilraunir með tvöfalt sporefni hefur verið lýst í ritrýndum heimildum [6], [7], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17].

3.2 Aðferð við tvöfalda sporefni $^3\text{He}/\text{SF}_6$

Aðferðin með sporefnum $^3\text{He}/\text{SF}_6$ felur í sér að dæla samtímis þessum tveimur lífjarðefnafræðilega óvirku sporlofttegundum út í hafið og mæla tímabundna breytingu á hlutfalli $^3\text{He}/\text{SF}_6$ til að ákvarða fastann k [6], [7]. Hlutfallið á milli k fyrir ^3He og SF_6 ($k_{^3\text{He}}$ og k_{SF_6}) má tákna sem:

$$\frac{k_{^3\text{He}}}{k_{\text{SF}_6}} = \left(\frac{S_{C_{^3\text{He}}}}{S_{C_{\text{SF}_6}}} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

þar sem $S_{C_{^3\text{He}}}$ og $S_{C_{\text{SF}_6}}$ eru Schmidt-tölurnar (þ.e. eðlisseigja vatns deilt með dreifnistuðli lofttegundarinnar í vatni) fyrir ^3He og SF_6 , í þeirri röð, og $-1/2$ er Schmidt-talan [18], [19]. Með því að sameina aðstreymis-dreifingarjöfnuna fyrir ^3He og SF_6 í vatni og fella inn jöfnu 1 er hægt að ákvarða $k_{^3\text{He}}$ svo sem hér segir [7]:

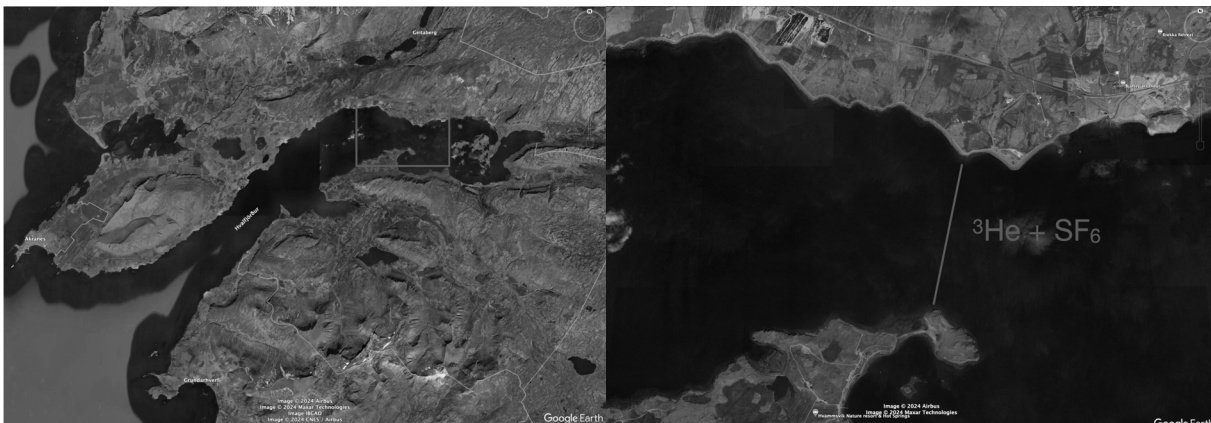
$$k_{3He} = -h \frac{d}{dt} \left(\frac{\ln \left(\frac{{}^3He_{exc}}{SF_6} \right)}{\left(1 - \left(\frac{Sc_{SF_6}}{Sc_{3He}} \right)^{-\frac{1}{2}} \right)} \right), \quad (2)$$

Þar sem SF_6 og ${}^3He_{exc}$ eru mælt SF_6 og umframstyrkur 3He (þ.e. styrkur umfram leysnifavnægi gagnvart andrúmslofti) í sjó, í þeirri röð, og h er dýpt blandaða lagsins. Til að ákvarða k verður notast við hlutfall 3He og SF_6 frá þremur stöðvum í röð.

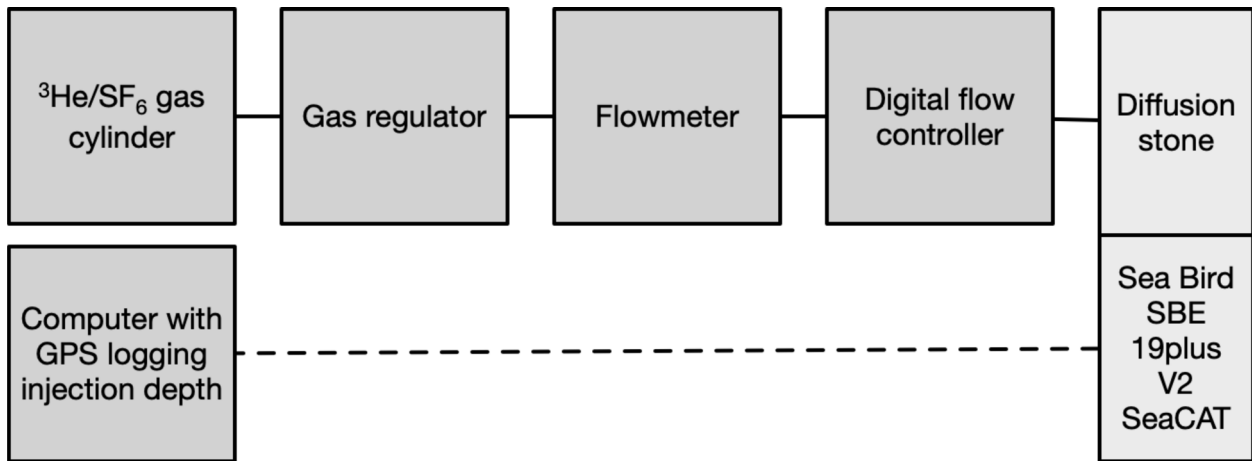
Að undanskildum þremur tilraunum [6], [11], [12] hafa vísindamenn Cworthy tekið þátt í öllum tilraunum með sporefnnin ${}^3He/SF_6$ sem gerðar hafa verið í heiminum [7], [8], [9], [10], [13], [14], [15], [16], [20], [17].

3.3 Dæling á ${}^3He/SF_6$

Rannsóknarteymið myndi dæla ${}^3He/SF_6$ í fjörðinn á sama hátt og teymið gerði við fyrri tilraunir í sjó og ám, með beinni dælingu á blöndu af lofttegundunum ${}^3He/SF_6$ í sjó með því að nota dreifistút (e. diffusion stone), sjá t.d. [7], [9], [20], [16], [21]. Sporefnnisinnspautun yrði gerð úr bátnum í fallaskiptum fyrir útfall. Meðan á inndælingu stendur er dreifistúturinn, sem er festur við CTD-búnað (SeaBird SBE 19plus V2 SeaCAT) til að ákvarða og stýra dýpt dælingar, tengdur við gashylki með þjöppuðu ${}^3He/SF_6$ og dreginn á eftir bátnum þegar hann fer yfir fjörðinn á ~ 20 mínútum.



MYND 2 Til vinstri: Hvalfjörður, þar sem rannsóknarteymið leggur til að tilraunin verði gerð. Svæðið í rauða reitnum vinstra megin er þar sem ${}^3He + SF_6$ yrði dælt. Til hægri: Rauða línan sýnir hvernig blöndu 3He og SF_6 verður dælt í fjörðinn.



MYND 3 Skýringarmynd sem sýnir uppsetningu dælingar á $^3\text{He}/\text{SF}_6$. Bleiku reitirnir sýna það sem verður eftir í skipinu og í bláu það sem fer í sjóinn. Heilu línurnar sem tengja hlutina eru leiðslur. Punktalínan er RS-232-kapall sem tengir tækjabúnaðinn á staðnum við tölvuna.

4 Mæliaðferðir í 1. áfanga

4.1 Sýnataka og mælingar

Rannsóknarteymið mun fylgjast með styrk SF₆ í firðinum í allt að eina til tvær vikur eftir dælingu með því að nota SF₆-greiningarkerfi á siglingaleið rannsóknaskips (e. Underway measurements). Nákvæma lýsingu á þessu kerfi og sýnatökuferlinu er að finna í birtri grein [22], [23], [24].

Stjórnækjum og gagnaöflun TSG-mælibúnaðar (e. thermosalinograph) og SF₆-kerfinu í skipinu yrði stýrt með tölum tengdum við GPS til að greina tíma- og staðsetningu hverrar sýnatöku.

Eins og rannsóknarteymið hefur gert í fyrri tilraunum með ³He/SF₆ í ám og ármynnum yrðu ³He og SF₆- sýni tekin daglega og notast við ³He/SF₆ frá 3 dögum í röð til að reikna út k samkvæmt jöfnu 2.

Aðferðir við mælingu sporefna og sýnatöku

SF₆ á siglingarleið skips. Yfirborðssjó frá vatnsinntaki bátsins yrði stöðugt dælt í gegnum TSG-mælibúnað (TSG; SBE 45 MicroTSG) inn í gassöfnunarkerfi. Síðan er SF₆ skilið frá öðrum lofttegundum með 5A sameindasíusúlu 5A við umhverfishita og sprautað í gasgreini sem búinn er rafeindahremmingar nema (GC-ECD) við 300 °C, þar sem notast er við afar hreint N₂ (UHP; 99,999%) sem burðargas. Kerfið hefur greiningarmörkin 1 x 10⁻¹⁴ mól L⁻¹ og greiningarnákvæmni, byggða á mælingum á 150 pptv-staðli, sem nemur ±1% fyrir 1,52 ml sýni.

³He/SF₆. Stök SF₆-sýni yrðu tekin úr Niskin-flöskunum í 550 ml glerflöskum með tappa úr slípuðu gleri og greind með sjálfvirku greiningarkerfi fyrir skolun og föngun SF₆ sem var hannað skv. Law o.fl. (1994). Við greiningu eru um 250 ml af sýninu flutt í gegnum sturtuhaus og í gasskólara (e. sparger). Lofttegundirnar eru því næst strípaðar með UHP N₂ í -70 °C síu sem er pökkuð með Porapak Q. Lofttegundirnar eru síðan losaðar við 110°C og sendar í 5A sameindasíusúlu, þar sem SF₆ er aðskilið frá öðrum lofttegundum og mælt með GC-ECD. Samanburðarnákvæmni byggð á tvöföldum sýnum er að jafnaði meiri en 2% [14].

Fyrir einstök ³He-sýni eru ~40 ml af sjó innsigluð í koparhylkjum með klemmum úr ryðfríu stáli og send til greiningar á rannsóknarstofu umhverfisfræðideildar háskólans í Bremen. Þar er ³He dregið úr koparhylkinu, flutt yfir í glerlykjur og mælt með helíumsamsætumassagreini (MAP215-50). Samkvæmni H³ er yfirleitt meiri en 0,5%. [25].

TAFLA 2 Yfirlit yfir mælingar.

Tegund	Breyta	Tilgangur	Aðferðir
1. áfangi: Losun á sporefnum $^3\text{He}/\text{SF}_6$			
Einstök sýni	^3He	Ákvarða loftskipti andrúmslofts og sjávar	Massagreining [25]
	Selta	Ákvarða lagskiptingu	Sea-Bird CTD
	SF_6	Ákvarða loftskipti andrúmslofts og sjávar	Gasgreining með rafeindahremmingu (skolun og föngun)
	Hitastig	Ákvarða lagskiptingu	Sea-Bird CTD
Mælingar á siglingu	Selta	Stöðug karbónatflokkun; dreifing um fjörðinn	Sea-Bird 45 TSG
	SF_6	Staðsetning sporefna á korti	Gasgreining með rafeindahremmingu (himna)
	Hitastig	Stöðug karbónatflokkun; dreifing um fjörðinn	Sea-Bird 45 TSG
Ytri	Vindhraði	Nauðsynlegt fyrir stikun loftskipta andrúmslofts og sjávar	Vindmæling

5 Mikilvægar upplýsingar um efnin sem notuð verða í 1. áfanga

SF₆

Brennisteinshexaflúoríð er efnafræðilega óhvarfgjörn lofttegund. Það er eðlisþyngra en loft og því myndi mikið magn valda hættu á köfnun í lokuðum rýmum. Rannsóknarteymið mun nota lítið magn (30 lítra) sem losað er í fjörðinn > 10 metra frá skipinu og því verður engin hætta á köfnun. SF₆ er öflug gróðurhúsalofttegund en losun á ~184 grömmum af SF₆ er óverulegt brot af þeim rúmlega 8 milljörðum gramma sem losuð eru árlega frá háspennurofbúnaði. Hnatthlúnunarmáttur 184 g af SF₆ jafngildir um 4600 kg af koldóoxíði og það verður því lítill hluti af heildarkolefnislosun tilraunarinnar, sem verður fyrst og fremst vegna eldsneytislosunar við flutninga.

³He

Helíum-3 er óhvarfgjörn eðlalofttegund sem hefur engin umhverfisáhrif. Það er léttara en loft og í rannsókninni er notað örlítið magn (< 0,5 lítra). Það verður losað blandað við SF₆, þar sem hlutfall ³He:SF₆ er 1:72.

TAFLA 3 Yfirlit yfir efniseiginleika, dreifingu og brotthvarf.

	SF ₆	³ He
Fyrhugaður tími dreifingar	Júlí 2024	Júlí 2024
Fyrirhuguð tímalengd dreifingar	U.þ.b. 6 klukkustundir	U.þ.b. 6 klukkustundir
Fyrirhuguð tímalengd vöktunar	Mest 14 dagar frá dreifingu	Mest 14 dagar frá dreifingu
Fyrirhugagð magn, losunartíðni	30 lítrar, 1,5 l/min	0,42 lítrar
Rök fyrir magni	Merki í 14 daga	Merki í 14 daga
Flutningsskip	Bjarni Thor ⁴	Bjarni Thor
Meðhöndlun í flutningum	Öruggt stálhylki	Öruggt stálhylki
Losunarbúnaður	Dreifari í togi	Dreifari í togi
Samantekt á mikilvægum upplýsingum, (eiturhrif, uppsöfnun í lífverum o.s.frv.)	Óhvarfgjörn lofttegund	Óhvarfgjörn lofttegund
Áætlaðu sýnileiki/viðstöðutími	Ósýnileg. Hægt að greina með nákvæmum búnaði á rannsóknarstofu í tvær til þrjár vikur.	Ósýnileg. Hægt að greina með nákvæmum búnaði á rannsóknarstofu í tvær til þrjár vikur.

⁴ [Upplýsingar um Bjarna Thor](#)

6 Álit utanríkisráðuneytisins

Þörf er á úrvali skilvirkra, örugggra og hagkvæmra valkosta til að fjarlægja koldíoxíð úr andrúmsloftinu til að ná alþjóðlegum viðurkenndum loftslagsmarkmiðum og -skuldbindingum. Þó að samfélagið sé óðum að ná árangri í að efla endurnýjanlega orku dugar viðleitni okkar til að draga úr losun gróðurhúsalofttegunda ekki til að vernda mikilvæg vistkerfi og samfélög gegn loftslagsbreytingum. Við erum nú í þeirri stöðu að ekki er nóg að draga úr losun heldur þarf líka að fjarlægja koldíoxíð úr andrúmsloftinu [26]. Aðferðinni sem lýst hefur verið í þessu skjali er viðurkennd af vísindasamfélaginu sem aðferð sem lofar góðu til að fjarlægja og geyma varanlega umfram koldíoxíð á stöðugu formi.

Með því að styðjast við reiknilíkan á haffræðilegum og hafefnafræðilegum ferlum í Hvalfirði, ráðgjöf íslenskra sérfræðinga og framlag frá vísindalegri ráðgjafanefnd hefur rannsóknarteymið hannað röð tilrauna til að leggja grunn að rannsókn á aukningu basavirkni sumarið 2025. Í þessu skjali hefur verið greint stuttlega frá rannsókninni allri, sem fyrirhugað er að ná yfir tvö ár, auk þess sem greint hefur verið ítarlegra frá 1. áfanga rannsóknarinnar sem varðar losun tveggja vistfræðilega skaðlausra sporlofttegunda, ^3He og SF_6 , og vöktun á hreyfingum þeirra innan fjarðarins sem stefnt er að sumarið 2024. Þróun líkans sem metur áhrif viðbætts basa sem og rannsóknir í Hvalfirði með tvöföldu sporefni eru bæði lykilþættir til að tryggja öryggi og skilvirkni framtíðarrannsókna.

Tekið skal fram að rannsóknarteymið hefur lagt ríka áherslu á gott skipulag og vandað verk. Einnig ver teymið miklum kröftum í að tryggja að tilraunarannsóknir hafi ekki skaðleg áhrif á umhverfi og lífríki sjávar. Mikilvægur þáttur í öllum rannsóknaráætlunum þeirra felur í sér vöktun og rannsóknir á áhrifum á vistkerfi. Umfang allra rannsókna á aukinni basavirkni yrði hóflegt en þær myndu leggja afar mikið til vísindalegrar undirbyggingar og hagnýtra þátta sem hafa þarf í huga þegar árangursríkar framkvæmdir til að auka basavirkni eru skipulagðar. Rannsóknarteymið leggur einnig ríka áherslu á gott samráð við stofnanir og lykilaðila í verkefninu.

Með þessari fyrirspurn er óskað eftir áliti sem og ábendingum utanríkisráðuneytisins gagnvart 1. áfanga rannsóknarinnar sem varðar losun sporlofttegunda. Rannsóknarteymið getur lagt fram viðbótargögn til að greina frekar frá rannsókninni, ef þess er óskað.

Viðhengi: Ljósmyndagögn um fyrri losun á $^3\text{He}/\text{SF}_6$



MYND 1 Slangan er fest við gashylki fyllt með $^3\text{He} / \text{SF}_6$.



MYND 2 Gashylki fyllt með $^3\text{He}/\text{SF}_6$ tengt við slöngu til dælingar.



MYND 3 Slanga fest við CTD-búnað, þ.m.t. lóð.



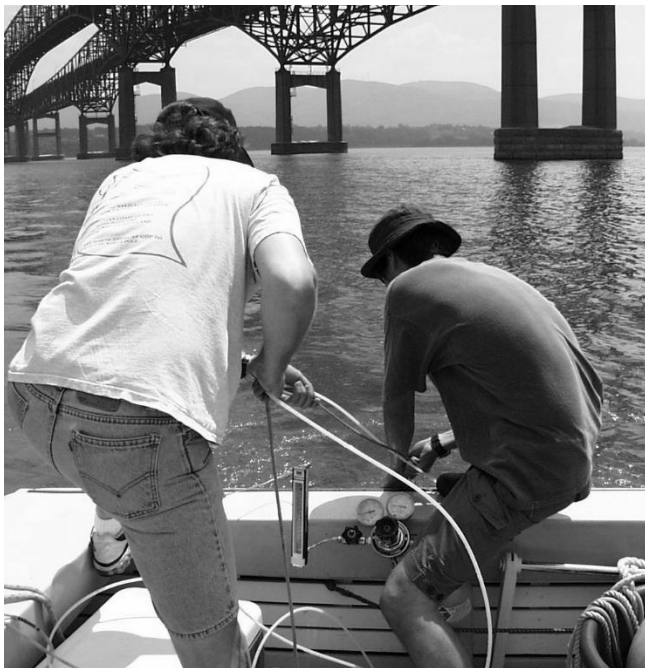
MYND 4 Slanga fest við CTD-búnað, þ.m.t. lóð.



MYND 5 Slanga fest við lóð.



MYND 6 Gashylki fyllt með 3He/SF6 tengt við streymismæli fyrir lofttegundir.



MYND 7 Dæling á 3He/SF6 í Hudson-á.



MYND 8 Slanga tengd við gashylki fyllt með 3He/SF6.

Heimildaskrá

- [1] National Academies, „A Research Strategy for Ocean Carbon Dioxide Removal and Sequestration,” [Á neti]. Available: <https://www.nationalacademies.org/our-work/a-research-strategy-for-ocean-carbon-dioxide-removal-and-sequestration>.
- [2] A. Oschlies, A. Stevenson, L. T. Bach, K. Fennel, R. E. M. Rickaby, T. Satterfield, R. Webb og J. P. Gattuso, „Guide to Best Practices in Ocean Alkalinity Enhancement Research (OAE Guide 23),“ Copernicus Publications, 2023.
- [3] J. N. Cross, D. K. Gledhill, C. Sweeny, J. Butler, E. B. Jewett, R. A. Feely, S. Theauerkauf, T. Stein og G. Kitch, „NOAA Carbon Dioxide Removal Research: A White Paper documenting a Potential NOAA CDR Science Strategy as an element of NOAA’s Climate Mitigation Portfolio,” NOAA, Washington DC, 2023.
- [4] EFLA, „Mat á rannsóknarstöðum vegna kolefnisbindingar í sjó,” 2023.
- [5] Mbl.is, „Fær 60 milljóna styrk til að rannsaka Hvalfjörð,” 2 Maí 2024. [Á neti]. Available: https://www.mbl.is/200milur/frettir/2024/05/02/faer_60_milljona_styrk_til_ad_rannsaka_hvalfjord/. [Skoðað 10 Maí 2024].
- [6] A. J. Watson, R. C. Upstill-Goddard og P. S. Liss, „Air-sea gas exchange in rough and stormy seas measured by a dual tracer technique,” *Nature*, b. 349, pp. 145-147, 1991.
- [7] R. Wanninkhof, W. Asher, R. Weppernig, H. Chen, P. Schlosser, C. Langdon og R. Sambrotto, „Gas transfer experiment on Georges Bank using two volatile deliberate tracers,” *Journal of Geophysical Research*, b. 98, pp. 20237-20248, 1993.
- [8] J. F. Clark, P. Schlosser, R. Wanninkhof, H. J. Simpson, W. S. F. Schuster og D. T. Ho, „Gas transfer velocities for SF6 and 3He in a small pond at low wind speeds,” *Geophysical Research Letters*, b. 22, pp. 93-96, 1995.
- [9] R. Wanninkhof, G. Hitchcock, B. Wiseman, G. Vargo, P. B. Ortner og W. E. Asher, „Gas Exchange, Dispersion, and Biological Productivity on the West Florida Shelf: Results from a Lagrangian Tracer Study,” *Geophysical Research Letters*, b. 24, nr. 14, pp. 1767-1770, 1997.
- [10] P. D. Nightingale, P. S. Liss og P. Schlosser, „Measurements of air-sea gas transfer during an open ocean algal bloom,” *Geophysical Research Letters*, b. 27, nr. 14, pp. 2117-2120, 2000.
- [11] P. D. Nightingale, G. Malin, C. S. Law, A. J. Watson, P. S. Liss og M. I. Liddicoat, „In situ evaluation of air-sea gas exchange parameterizations using novel conservative and volatile tracers,” *Global Biogeochemical Cycles*, b. 41, nr. 1, pp. 373-387, 2000.
- [12] R. Wanninkhof, K. F. Sullivan og Z. Top, „Air-sea gas transfer in the Southern Ocean,” *Journal of Geophysical Research-Oceans*, b. 109, nr. C8, 2004.

- [13] D. T. Ho, C. S. Law, M. J. Smith, P. Schlosser, M. Harvey og P. Hill, „Measurements of air-sea gas exchange at high wind speeds in the Southern Ocean: Implications for global parameterizations,” *Geophysical Research Letters*, b. 33, 2006.
- [14] D. T. Ho, R. Wanninkhof, P. Schlosser, D. S. Ullman, D. Hebert og K. F. Sullivan, „Towards a universal relationship between wind speed and gas exchange: Gas transfer velocities measured with $^3\text{He}/\text{SF}_6$ during the Southern Ocean Gas Exchange Experiment,” *J. Geophys. Res.*, b. 116, 2011.
- [15] M. E. Salter, R. C. Upstill-Goddard, P. D. Nightingale, S. D. Archer, B. Blomquist og D. T. Ho, „Impact of an artificial surfactant release on air-sea gas fluxes during Deep Ocean Gas Exchange Experiment II,” *J. Geophys. Res.*, b. 116, nr. C11, 2011.
- [16] D. T. Ho og R. Wanninkhof, „Air-sea gas exchange in the North Atlantic: $^3\text{He}/\text{SF}_6$ experiment during GasEx-98,” *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, b. 68, nr. 1, 2016.
- [17] R. Dobashi og D. T. Ho, „Air–sea gas exchange in a seagrass ecosystem – results from a $^3\text{He}/\text{SF}_6$ tracer release experiment,” *Biogeosciences*, b. 20, nr. 6, pp. 1075-1087, 2023.
- [18] J. R. Ledwell, „The variation of the gas transfer coefficient with molecular diffusivity,” í *W. Brutsaert & G. H. Jirka (Eds.), Gas transfer at water surfaces*, Hingham, Massachusetts: Reidel, 1984, pp. 293-302.
- [19] B. Jähne, O. Munnich, R. Bosinger, A. Dutzi, W. Huber og P. Libner, „ On the parameters influencing air-water gas exchange,” *Journal of Geophysical Research*, b. 92, nr. C2, pp. 1937-1949, 1987.
- [20] D. T. Ho, N. Coffineau, B. Hickman, N. Chow, T. Koffman og P. Schlosser, „Influence of current velocity and wind speed on air-water gas exchange in a mangrove estuary,” *Geophys. Res. Lett.*, b. 43, 2016.
- [21] D. T. Ho, E. H. De Carlo og P. Schlosser, „Air-Sea Gas Exchange and CO_2 Fluxes in a Tropical Coral Reef Lagoon,” *Journal of Geophys. Res.*, b. 123, nr. 12, pp. 8701-8713, 2018.
- [22] D. T. Ho, P. Schlosser og T. Caplow, „Determination of longitudinal dispersion coefficient and net advection in the tidal Hudson River with a large-scale, high resolution SF_6 tracer release experiment,” *Environmental Science & Technology*, b. 36, nr. 15, pp. 3234-3241, 2002.
- [23] T. Caplow, P. Schlosser, D. T. Ho og N. Santella, „Transport dynamics in a sheltered estuary and connecting tidal straits: SF_6 tracer study in New York Harbor,” *Environmental Science & Technology*, b. 37, nr. 22, pp. 5116-5126, 2003.
- [24] D. T. Ho, P. Schlosser og P. Orton, „On Factors Controlling Air–Water Gas Exchange in a Large Tidal River,” *Estuaries and Coasts*, pp. 1-14, 2011.
- [25] J. Sültenfuß, W. Roether og M. Rhein, „The Bremen mass spectrometric facility for the measurement of helium isotopes, neon, and tritium in water,” *Isotopes in Environmental and Health Studies*, b. 45, nr. 2, pp. 83-95, 2009.

[26] IPCC, „Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,“ Cambridge University Press, Cambridge, 2022.