



RÖST
SJÁVAR
RANNSÓKNA
SETUR

20. desember 2024



Umsókn um rannsóknarleyfi vegna frumrannsóknar á aukinni
basavirkni sjávar í Hvalfirði

Efnisyfirlit

1. Inngangur	5
1.1. Tilgangur rannsóknarinnar	5
1.2. Umsókn um rannsóknarleyfi	6
1.3. Lög og reglugerðir sem varða rannsóknina	7
1.4. Alþjóðasamningar	9
2. Skipulag og þátttakendur	12
2.1. Rannsóknarteymi	12
2.2. Samstarfsfólk, styrkþegar og verktakar	13
3. Rannsóknarsvæði	14
3.1. Staðarlýsing	15
3.2. Verndarsvæði	16
4. Tímalína og undirbúningur rannsókna	18
4.1. Tímalína	18
4.2. Yfirlit undirbúningsrannsókna	19
4.3. Söfnun grunngagna	20
5. Lýsing rannsókna	21
5.1. Rannsóknarspurningar	21
5.2. Rannsókn með flúrljómandi litarefni	22
5.3. Rannsókn á viðbót basa með því að nota NaOH, SF ₆ og flúrljómandi litarefni	23
5.3.1. Rök fyrir magni af basa sem notað verður í rannsókn	25
5.3.2. Áætlað blöndunarsvæði	28
5.3.3. Lykilumhverfispættir	31
5.3.4. Mælingar og vöktun	32
5.3.5. Tæknileg atriði er varðar losun	34
5.4. Væntar niðurstöður úr rannsókn	35
6. Öryggisráðstafanir og viðbragðsáætlun	37
7. Upplýsingar um landeigendur	38
8. Samtal við stjórnvöld, hagaðila og samfélagið	39
Heimildir	41
Viðaukar	43
Viðauki I: Background on Ocean Alkalinity Enhancement	43
Viðauki II: Importance of OAE Field Trials	43
Viðauki III: OAE Site Location Information	43
Viðauki IV: Baseline Data Collection	43

Viðauki V: Regional Ocean Model Development	43
Viðauki VI: Field Trial Report 2024	43
Viðauki VII: Estimation of background variability of alkalinity in Hvalfjorður	43
Viðauki VIII: Near-Field Mixing Model	43
Viðauki IX: NaOH toxicity study	44
Viðauki X: Tracer release experiment in Regional Ocean Modeling System	44
Viðauki XI: Áhrifamat á vatnshlot 104-1330-C og 104-1236-C	44

Listi yfir skammstafanir

ADCP	Straumsjá
ASV	Sjálfvirkt yfirborðsfar
CO ₂	Koldíoxíð
CDR	Fjarlæging koldíoxíðs
CTD	Leiðni, Hitastig, Dýpi (vísar til mælitækis)
DIC	Uppleyst ólífrænt kolefni
IBC	Bambi/Gámur af millistærð
MFRI	Hafrannsóknastofnun
MRV	Vöktun, Skrásetning, Sannprófun
NaOH	Natríumhýdroxíð
NO ₃	Nítrat
OAE	Aukning á basavirkni
PAR	Geislun til staðar fyrir ljóstillífun
pCO ₂	Hlutþrýstingur koldíoxíðs
PO ₄	Fosfat
SF ₆	Brennisteins hexaflúoríð
TA	Heildar basavirkni
TSS	Heildarmagn fastra efna í sviflausn

1. Inngangur

1.1. Tilgangur rannsóknarinnar

Tilgangur þessara rannsókna er að auka vísindalegan og tæknilegan skilning á aðferðinni sem felst í aukningu á basavirkni sjávar (OAE) sem aðferðar til að fjarlægja koldíoxíð (CO_2) úr andrúmsloftinu (CDR). Rannsóknin samanstendur af tveimur aðskildum rannsóknum sem stefna að því að sýna fram á CDR með því að nota natriúmhydrosíð (NaOH) til að auka basavirkni sjávar í Hvalfirði sumarið 2025. Annars vegar er um að ræða litarefnisrannsókn sem áætluð er í maí 2025 og hins vegar basavirknirannsókn sem áætluð er í júlí 2025.

Röst sjávarrannsóknasetur¹ stendur fyrir þessum tveimur rannsóknum í samstarfi við Carbon to Sea Initiative² og alþjóðlegt rannsóknarteymi.

OAE líkir eftir náttúrulegri veðrun bergs, sem stýrir CO_2 í andrúmslofti á árpúsunda tímaskala.³ OAE er aðferðafræði sem lofar góðu til að fjarlægja CO_2 úr andrúmslofti og geyma varanlega sem bikarbónat, sem er stöðugt efnaform sem þegar er til staðar í miklu magni í heimshöfunum. CDR með OAE gerist í tveimur skrefum: 1) fyrst með því að auka basavirkni og lækka hlutþrýsting CO_2 við yfirborð sjávar; 2) síðan með því að sjórinn og andrúmsloftið leitast við að ná nýju jafnvægisástandi með loftskiptum milli lofts og sjávar.⁴

Hafefnafræðin sem liggur að baki OAE er vel rannsökuð og þekkt (sjá viðauka I), en til að marka leið að þróun á þessari vænlegu aðferð til CDR þarf að sýna fram á með vettvangsrannsóknum að:

- I. tæknilegu aðferðirnar til að auka basavirkni sjávar virki,
- II. rekja megi breytingarnar á basavirkninni í sjónum til tæknilegu aðferðanna og
- III. mæla áhrifin og staðfesta (sjá viðauka II fyrir frekari útskýringar).^{5 6 7}

¹ www.rostrannsoknir.is

² www.carbontosea.org

³ Kheshgi, 1995, Kump et al, 2000

⁴ Stutt myndband (4 mín) frá ClimateWorks dregur saman OAE aðferðafræðina:

<https://www.youtube.com/watch?v=5obQ6aGSyHY>

⁵

<https://www.nationalacademies.org/our-work/a-research-strategy-for-ocean-carbon-dioxide-removal-and-sequestration>

⁶ <https://sp.copernicus.org/articles/sp-oae2023-full-report.pdf>

⁷ <https://sciencecouncil.noaa.gov/wp-content/uploads/2022/09/Clean-copy-of-Draft-CDR-Research-Strategy.pdf>

Röst er í samvinnu við rannsóknateymi frá [C]Worthy⁸ (sem er óhagnaðardrifið félag) og við verkfræðinga frá Ebb Carbon⁹ (við afmarkaða þætti rannsóknarinnar) til að framkvæma þessa rannsókn sem samanstendur af:

1. rannsókn með flúrljómandi litarefni í maí 2025
2. basavirknirannsókn í júlí 2025.

Basavirknirannsóknin miðar að því að losa natríumhýdroxíð (NaOH) frá bryggju norðaustanmegin í Hvalfirði og nýta þannig innviði sem þegar eru til staðar í firðinum. Áætlað er að dreifa efninu í hæfilega mikið rúmmál af sjó til að hægt sé að mæla CDR virkni OAE. Dreifingunni verður stýrt og áhrifin vöktuð til að forðast langvarandi frávik á pH sem gætu haft áhrif á lífríki sjávar. Með því að framkvæma þessa rannsókn þá vill Röst fá skilning á möguleikum OAE með NaOH til að taka upp CO₂, skoða skilvirkni aðferðarinnar og meta vistfræðilegt öryggi.

1.2. Umsókn um rannsóknarleyfi

Röst sjávarrannsóknasetur sækir hér með um rannsóknarleyfi til lítillar frumrannsóknar á aukinni basavirkni sjávar í Hvalfirði í maí og júlí 2025. Rannsóknarleyfið er sótt til utanríkisráðuneytisins í samræmi við 9. gr. laga nr. 41/1979 um landhelgi, efnahagslögsögu og landgrunn.

Í 10. gr. laganna eru talin upp gögn og upplýsingar sem leggja skal fram með umsókn um rannsóknarleyfi. Gerð er grein fyrir því í eftirfarandi köflum umsóknarinnar:

1. *Eðli og markmið rannsókna.* Sjá kafla 1 um markmið rannsókna.
2. *Rannsóknaraðferð, þ.á m. nafn, stærð, tegund og gerð skipa og lýsingu á rannsóknartækjum.* Sjá kafla 2 um þátttakendur og kafla 5 um rannsóknaráætlun.
3. *Nákvæm staðsetning svæða, sem rannsaka á.* Sjá kafla 3 um rannsóknarsvæði og kafla 5 um staðsetningu mælinga og sýnatöku.
4. *Upphaf og lok rannsóknartímabils.* Sjá kafla 4 um tímalínu.
5. *Nafn stofnunar, sem að rannsóknnum stendur, nafn forstjóra hennar og framkvæmdastjóra rannsóknaleiðangurs.* Sjá kafla 2 um þátttakendur.

⁸ www.cworthy.org

⁹ www.ebbcarbon.com

6. *Fyrirhuguð þátttaka íslenskra stjórnvalda í rannsóknum.* Sjá kafla 2 um þátttakendur og samstarfsaðila sem og um ráðgjafaráð í kafla 8.

Að auki er í umsókninni gerð grein fyrir öðrum lögum og reglugerðum og alþjóðasamningum sem rannsókna varða og hvernig rannsóknaraðilar taka tillit til þeirra. Sjá kafla 1.3 um lög og reglugerðir og kafla 1.4 um alþjóðasamninga.

Ekki er ákvæði um eftirlit með rannsóknum í lögum nr. 41/1979. Umsækjandi leggur til að eftirlit með rannsókninni verði í höndum Umhverfis- og orkustofnunar þar sem skv. lögum um stjórn vatnamála nr. 36/2011 annast stofnunin stjórnsýslu á sviði vatnsverndar. Eftirlit Umhverfis- og orkustofnunar getur til dæmis falist í að taka við gögnum um niðurstöður, fá tilkynningu um óvæntar breytingar og að stofnunin hafi heimild til að bregðast við aðstæðum sem upp koma, ef ástæða er til.

1.3. Lög og reglugerðir sem varða rannsókna

Lög nr. 41/1979 um landhelgi, efnahagslögsögu og landgrunn

Rannsóknin fer fram í sjó á landgrunni Íslands og fellur undir kafla VI. um vísindalegar rannsóknir og er þessi umsókn unnin í samræmi við þann kafla. Í kafla V. er fjallað um ráðstafanir gegn mengun og kveðið á um að skylt sé að forðast allt það sem geti mengað eða á annan hátt spillt hafinu. Fjallað er nánar um mengun hafs og stranda í nýrri lögum hér að neðan og er vísað til þeirrar umfjöllunar.

Lög nr. 36/2011 um stjórn vatnamála og reglugerð nr. 935/2011 um stjórn vatnamála

Markmið laga um stjórn vatnamála er að vernda vatn og vistkerfi þess, hindra frekari rýrnun vatnsgæða og bæta ástand vatnavistkerfa þar sem þess er talin þörf. Skilgreind hafa verið vatnshlot, sem eru stjórnsýslueiningar sem fá tiltekið númer. Öll vatnshlot skulu uppfylla umhverfismarkmið og vera í góðu vistfræðilegu ástandi, góðu efnafræðilegu ástandi og ástand þeirra skal ekki rýrna. Hafi aðgerðir eða framkvæmdir áhrif á umhverfismarkmið vatnshlots má sækja um heimild þar sem fyrir liggur áhrifamat. Í viðauka XI má finna áhrifamat á vatnshlotin.

Í Hvalfirði eru tvö vatnshlot:

- I. Hvalfjörður - strandsjór - 104-1330-C
- II. Hvalfjarðarbotn - strandsjór - 104-1236-C

Vistfræðilegt ástand er „óflokkað“ og efnafræðilegt ástand „óþekkt“ en vatnshlotin eru ekki metin í hættu á að ná ekki umhverfismarkmiðum. Álag á vatnshlotið *Hvalfjörður* er skráð frá iðnaðarstarfsemi á Grundartanga. Ekki er skráð álag á vatnshlotið *Hvalfjarðarbotn*.

Til að meta hvort skyldur samkvæmt lögum um stjórn vatnamála séu uppfylltar eru rannsóknaraðilar að mæla grunnástand í vatnshlotunum, þ.m.t. líffræðilega, efnafræðilega og eðlisfræðilega gæðapætti sem notaðir eru til að meta ástand strandsjávar. Rannsóknin sjálf er hönnuð til að koma í veg fyrir neikvæð áhrif en reynt er að hafa magn efna þó nægilega mikið til að gefa greinilegt merki fyrir rannsókna. Magn efna sem notuð verða tekur mið af prófunum sem gerðar voru í Hvalfirði sumarið 2024, líkan af straumum í firðinum, mælingum á virkni NaOH á lífverur og þekkingu rannsóknarteymis frá sambærilegum rannsóknum annars staðar í heiminum. Tímasetning losunar varir einungis í 48-96 klukkustundir og losun basans tekur mið af sjávarstraumum. Áhrif rannsóknar á gæðapættina eru vöktuð með mælingum og sýnatökum, eins og lýst er í rannsóknaráætlun. Sjá nánar rannsóknaráætlun kafla 5 og um viðbragðsáætlun kafla 6.

Lög nr. 33/2004 um varnir gegn mengun hafs og stranda

Í 9. gr. laganna er kveðið á um að varp efna í hafið sé óheimilt en heimild er til að veita leyfi fyrir varpi tiltekinna efna og hluta. Í 27. lið 3. gr. er varp skilgreint og tilgreint er hvað telst ekki varp, þ.m.t. „Að koma fyrir efnun eða hlutum í hafinu í öðrum lögmætum tilgangi en að farga þeim“. Í rannsókninni verður NaOH, SF₆ og ródamíni komið fyrir í hafinu í lögmætum rannsóknartilgangi. Rannsóknin fellur því ekki undir ákvæði um bann við varpi efna í hafið.

Efnalög nr. 61/2013

Við rannsókna verða notuð efni sem flokkast sem hættuleg efni skv. efnalögum. Um þau gilda reglur um flutning, notkun, geymslu og förgun í samræmi við hættulega eiginleika þeirra. Við framkvæmd rannsóknarinnar verður gætt að því að efnin séu meðhöndluð í samræmi við löginn sem og leiðbeiningar framleiðenda efnanna. Starfsfólk fær þjálfun í meðferð efnanna og öryggisblöð og viðbragðsáætlun verða tiltæk. Sjá nánar í kafla 6.

Reglugerð nr. 1066/2019 um flúoraðar gróðurhúsalofttegundir

Í rannsókninni verður notað sporefnið SF₆ sem tilheyrir hópi flúoraðra gróðurhúsalofttegunda. Skoðað hefur verið hvort staðgöngukostir séu í boði og hverjir kostir og gallar notkunar efnisins eru. SF₆ er vel þekkt sporefni og mjög óhvarfgjörn lofttegund og því skaðlaus umhverfi sjávarins. Til eru margprófaðar mæliaðferðir til að meta styrk þess á mjög breiðu styrkbili með nákvæmum hætti. Því eru bæði vistfræðileg og tæknileg rök fyrir notkun þess. Þessi aðferð hefur verið notuð víða á undanförunum áratugum til að ákvarða hraða loftskipta milli andrúmslofts og sjávar. Sporefnatækni með SF₆ hefur verið notuð í tilraunum um allan heim síðastliðna þrjá áratugi og birtar um hana fjöldi ritrýndra greina. Staðgöngukostir eru því ekki í auglýn.

Reglugerð nr. 796/1999 um varnir gegn mengun vatns

Í reglugerðinni eru sett gæðamarkmið og umhverfismörk fyrir vatn og losunarmörk vegna losunar ýmissa hættulegra efna í vatn. Fjallað er um starfsleyfi til atvinnurekstrar og þýnningarsvæði vegna losunar í vatn. Einnig er fjallað um verndun neysluvatns. Reglugerðin tekur til hvers konar atvinnurekstrar hér á landi og í mengunarlögsögunni og tekur til athafna einstaklinga eftir því sem við á. Umhverfismörk eru gefin fyrir saurkólígerla, næringarefni/lífræn efni og þungmálma og í viðauka er listi yfir efni sem skal vakta sérstaklega. Efnin sem verða notuð í tilrauninni eru ekki á þessum listum.

Reglugerð nr. 798/1999 um fráveitur og skólp

Reglugerðin snýr að mestu að skólphreinsistöðvum en þar má finna ákvæði um sýrustig utan þýnningarsvæða og því er reglugerðin nefnd hér. Reglugerðin vísar þó einungis til breytinga á pH í ám og vötnum en ekki í sjó eins og þessi rannsókn snýst um. Í fylgiskjali 1:B í reglugerð segir. „Í ám og vötnum utan þýnningarsvæðis skulu eftirfarandi umhverfismörk gilda: Sýrustig, pH: 6-9. Hámarksbreyting á sýrustigi vegna frárennsli: 0,5.“ Við leit í starfsleyfum útgefnum af Umhverfisstofnun fundust dæmi um að tiltekið sé hærra sýrustig sem leyft er í frárennsli fyrirtækja, ýmist almennt eða tímabundið. Því eru til fordæmi fyrir leyfi til þess að sleppa efnum sem hækka sýrustig staðbundið.

1.4. Alþjóðasamningar

Rannsóknarverkefnið fellur undir *Samning Sameinuðu þjóðanna um varnir gegn mengun hafsins vegna losunar úrgangsefna og annarra efna í það* (1972). Loftslagsverkfræðilegar aðgerðir á hafi („marine geoengineering“) eru skilgreindar í breytingum á Lundúnabókuninni (1996) sem gerðar voru árið 2013:

„Haf loftslagsverkfræði merkir vísvitandi inngrip í lífríki hafsins til að stjórna náttúrulegum ferlum, þar á meðal til að vinna gegn loftslagsbreytingum af mannavöldum og/eða áhrifum þeirra og sem getur haft skaðleg áhrif, sérstaklega þar sem þessi áhrif geta verið viðtæk, langvarandi eða alvarleg.“

Samkvæmt Lundúnarbókuninni er meginreglan sú að bannað er að setja efni og hluti í hafið og farga þeim og er það ákvæði innleitt í lög um mengun hafs og stranda nr. 33/2004. Samþykktar voru breytingar á bókuninni árið 2013, sem hafa ekki tekið formlega gildi, til að gera aðildarríkjum kleift að veita leyfi fyrir ákveðnum tegundum loftslagsverkfræðilegra aðgerða að uppfylltum tilteknum skilyrðum. Breytingin náði einungis til verkefna þar sem styrkur næringarefna í yfirborði sjávar er aukinn (e. ocean fertilization) en gert var ráð fyrir að bæta fleiri tegundum af aðgerðum við síðar. Nú er unnið að því að meta m.a. aðgerðir til að auka

basavirkni sjávar (OAE), líkt og þessi umsókn fjallar um. Við ákvarðanir um leyfi til rannsókna á þessu sviði eru aðildarríkin hvött til að fara eftir reglum og leiðbeiningum sem samþykktar voru 2013 og síðari viðbótum. Hvatt er til varkárni og að fylgt skuli leiðbeiningum um mat á vísindalegum rannsóknum til að tryggja vernd hafsins í samræmi við markmið samningsins og bókanna við hann.

Í viðauka V í breytingunum við Lundúnarbókunina¹⁰ eru settar fram reglur um leyfisveitingar fyrir rannsóknir vegna loftslagsverkfræðilegra aðgerða. Gerð er grein fyrir því í eftirfarandi köflum umsóknarinnar:

1. Vísindalegir þættir

I. Markmið rannsókna: Markmið rannsóknarinnar er skapa þekkingu á aukinni basavirkni sjávar (OAE) sem aðferð til að fjarlægja koldíoxíð úr andrúmslofti (CDR), sjá kafla 1.

II. Eiginleikar efna sem sett verða í hafið: Í rannsókninni verður NaOH, SF₆ og ródamíni komið fyrir í hafinu. Fjallað er um eiginleika þeirra í kafla 5.

III. Lýsing aðgerðar: Rannsókninni er lýst í köflum 3 til 5.

IV. Lýsing á landfræði svæðis og umhverfisaðstæðum á rannsóknarsvæði: Rannsóknarsvæðið er í Hvalfirði. Tilraunirnar fara fram í norðausturhluta Hvalfjarðar frá bryggju Ólfudreifingar við Miðsand, en rannsóknarsvæðið sjálft er allur fjörðurinn. Í staðarvalsgreiningu var horft til hafstrauma, gerð sjávarbotns, lífríkis, fyrirbyggjandi rannsóknir og hvort jökulá renni inn á svæðið. Eins var horft til innviða eins og vega, fjarlægð til næstu hafnar, rannsóknarstöðva og alþjóðaflugvallar, sem og atvinnustarfsemi á svæðinu eins og skipasamgöngur, fiskeldi og haftengd ferðaþjónusta. Í Hvalfirði eru alþjóðlega mikilvæg fuglasvæði og svæði á B-hluta og C-hluta Náttúruminjaskrár. Nánari lýsing á rannsóknarsvæðinu er í kafla 3.

V. Möguleg áhrif á heilsu manna, lífríki og aðra lögmæta notkun á hafumhverfi: Rannsóknin felur í sér mat á áhrifum á efnafræðilega, eðlisfræðilega og líffræðilega þætti sjávar. Mat á grunnástandi svæðisins er unnin af Hafrannsóknastofnun, sjá kafla 4.3. Í kafla 5 er fjallað um lykilumhverfisþætti og vöktun þeirra og í viðauka XI er áhrifamat á vatnshlotin. Að auki má finna öryggisráðstafanir og viðbragðsáætlun í kafla 6.

VI. Möguleg skaðleg áhrif og hvort þau gætu orðið veruleg, útbreidd eða langvinn: Rannsóknin er tímabundin og efnin eru notuð í magni sem ætlað er að hafi ekki veruleg, langvinn eða útbreidd skaðleg áhrif. Magnið er þó nægilega mikið til að gefa greinilegt merki fyrir rannsóknina. Magnið tekur einnig mið af því að það sé innan umhverfislega öruggra marka, sjá kafla 5.

¹⁰ Viðauki V: [Guidance for consideration of marine geoengineering activities](#)

VII. Aðgerðir, staðlar eða viðmið til að vernda umhverfið fyrir áhrifum aðgerða: Í rannsókninni eru mældir gæðapættir sem tilgreindir eru í lögum um stjórn vatnamála. Vaktað verður hvort aðgerðin hafi áhrif á þá þætti, sjá kafla 5, 6 og viðauka XI.

Ekki er ákvæði um eftirlit með rannsóknum í lögum nr. 41/1979. Umsækjandi leggur til að eftirlit með rannsókninni verði í höndum Umhverfis- og orkustofnunar þar sem skv. lögum um stjórn vatnamála nr. 36/2011 annast stofnunin stjórnsýslu á sviði vatnsverndar. Eftirlitið getur til dæmis falist í sé að taka við gögnum um niðurstöður, fá tilkynningu um óvæntar breytingar og að stofnunin hafi heimild til að bregðast við aðstæðum sem upp koma, ef ástæða er til.

VIII. Virkni aðgerða til að ná markmiðum um að fjarlægja koldíoxíð úr andrúmslofti: Með rannsókninni verður til þekking á loftslagsverkfræðilegum aðferðum sem byggja á aukningu basavirkni sjávar. Talsverð þekking hefur byggst upp með tilraunum á rannsóknarstofum, *mesocosm* og líkanreikningum en nauðsynlegt er að prófa aðferðir í raunaðstæðum. Nú þegar eru hafnar vettvangsrannsóknir á þessu sviði í Kanada og Bandaríkjunum. Rannsóknin er grunnur fyrir vöktun, skráningu og staðfestingu (MRV) á aðferðafræðinni. Niðurstöður verða aðgengilegar öllum og munu nýtast vísindamönnum sem viðmið, minnka óvissu og auka öryggi rannsókna. Sjá nánar í kafla 1 og 5.

IX. Staða þekkingar, óvissa, þekkingarskortur: Fyrir liggur ítarleg greining á stöðu þekkingar og rannsóknin miðar að því að bæta þekkingu þar sem er óvissa og skortur á upplýsingum, sjá viðauka I og viðauka II.

2. Félagslegir og efnahagslegir þættir

Rannsóknin er afmörkuð og tímabundin og hefur ekki víðtæk félagsleg eða efnahagsleg áhrif. Samráð hefur verið við sveitarfélög, fyrirtæki, hagaðila og almenning á svæðinu til að upplýsa um hvað verður gert, hvernig og af hverju. Samskiptaáætlun hefur verið gerð og vonir standa til að almenningur hafi tækifæri á að kynna sér verkefnið nánar. Sjá kafla 8.

3. Samræmi við skyldur samkvæmt lögum og alþjóðasamningum

Gerð er grein fyrir því hvaða íslensku lög og reglugerðir hafa áhrif á rannsóknina og hvernig er brugðist við því í kafla 1.3 og fjallað er um alþjóðasamninga í þessum kafla.

Alþjóðleg samvinna um loftslagsmál grundvallast á samningi Sameinuðu þjóðanna um loftslagsbreytingar (UNFCCC) og Parísarsamkomulaginu. Samstarfið felst m.a. í að því að samhæfa aðgerðir til að draga úr loftslagsbreytingum og undirbúa óhjákvæmilega aðlögun að breytingum. Ríki eru jafnframt hvött til þess að „*contribute to ... [a]ccelerating zero- and low-emission technologies, including ... removal technologies.*“ Ríki leggja jafnframt áherslu á „*the importance of protecting, conserving and restoring nature to achieve the Paris Agreement*“

temperature goal, including through ... marine ecosystems acting as sinks and reservoirs of greenhouse gases.”

Hafréttarsamningur Sameinuðu þjóðanna (UNCLOS) er alþjóðlegur samningur um réttindi og skyldur ríkja við nýtingu hafsvæða sem var saminn á þriðju ráðstefnu Sameinuðu þjóðanna um hafréttarmál sem haldin var á árunum frá 1973 til 1982. Í samningnum kemur fram að ríki skulu grípa til allra nauðsynlegra ráðstafana til að koma í veg fyrir, draga úr og hafa stjórn á mengun sjávarumhverfis. Nýlega kom fram ráðgefandi álit frá Alþjóðlega hafréttardóminum (e. International Tribunal for the Law of the Sea, Itlos), sem er sjálfstæður dómstóll undir Hafréttarsamningnum. Þar kemur fram að ríkjum ber skylda til að *skilgreina losun gróðurhúsalofttegunda af mannavöldum sem mengun hafsvæða* og beri skylda til að grípa til aðgerða til að vernda lífverur á hafsvæðum sem er ógnað af áhrifum loftslagsbreytinga.¹¹

2. Skipulag og þátttakendur

2.1. Rannsóknarteymi

	Nafn	Titill	Fyrirtæki	Hlutverk / Sérfræðipækking	Samskipta-upplýsingar
Stjórnun rannsóknastöðva	Salome Hallfredsdóttir	Forstjóri	Röst sjávar-rannsóknasetur	Þróun rannsóknastöðva til vettvangs-rannsókna	salome@rostrannsoknir.is
	Irene Polnyi	Stjórnar-formaður	Röst sjávar-rannsóknasetur		irene@carbontosea.org
		Yfirmaður vettvangs-rannsókna	Carbon to Sea Initiative		
Vöktun á sporefnum og ólífrænu kolefni í sjó	Dr. David Ho	Yfirvísinda maður	[C]Worthy	Stýring vísindahluta; Hafefnafræðilegar athuganir	david@cworthy.org
	Dr. Toby Koffman	Vísinda-maður	[C]Worthy	Hafefnafræðilegar athuganir	toby@cworthy.org

¹¹ https://www.itlos.org/fileadmin/itlos/documents/press_releases_english/PR_350_EN.pdf

	Nafn	Titill	Fyrirtæki	Hlutverk / Sérfræðipækking	Samskipta-upplýsingar
	Dr. Lennart Gerke	Postdoc	[C]Worthy	Hafefnafræðilegar athuganir	lennart@cworthy.org
	Audria F. Dennen	Rannsóknar tæknir	Röst sjávar-rannsóknasetur	Hafefnafræðilegar athuganir, starfsemi á vettvangi	audria@rostrannsoknir.is
Vöktun á líffræðilegum þáttum	(interim) Dr. David Keller	Yfirmaður rannsóknar og tækni	Carbon to Sea Initiative	Líffræðileg haffræði	david@carbontosea.org
	Birkir Bárðarson	Verkefnastjóri	Röst sjávar-rannsóknasetur	Sjávarlíffræði, starfsemi á vettvangi	birkir@rostrannsoknir.is
Gagnavísindi og líkanagerð	Dr. Ulla Heede	Vísindamaður	[C]Worthy	Hafefnafræðileg líkangerð	ulla@cworthy.org
	Dr. Matt Long	CEO	[C]Worthy	Hafefnafræðileg líkangerð	matt@cworthy.org
	Dr. Alicia Karspeck	CTO	[C]Worthy	Hafefnafræðileg líkangerð	aliciak@cworthy.org

2.2. Samstarfsfólk, styrkþegar og verktakar

	Fyrirtæki / Stofnun	Hlutverk / Sérhæfing	Tengiliður	Samskiptaupplýsingar
Grunnrannsóknir	Hafrannsóknastofnun	Verkefnastjóri	Sjöfn Gunnarsdóttir	sjofn.gunnarsdottir@hafogvatn.is
Verkfræði	Ebb Carbon	Stýring	Jeremy Loretz	jeremy

	Fyrirtæki / Stofnun	Hlutverk / Sérhæfing	Tengiliður	Samskiptaupplýsingar
dreifikerfis		verkfræðiþáttar, efnaverkfræði		@ebbcarbon.com
Bygging dreifikerfis	Óákveðið	Bygging, uppsetning, prófanir	Óákveðið	Óákveðið
Blöndunarlíkan nærri losunarstað	Vatnaskil	Þróun á hydródynamísku líkani	Sveinn Óli Pálmarsson	sop@vatnaskil.is
Umsjón losunarstaðs	Olíudreifing	Öryggis- og umhverfisstjóri	Gestur Guðjónsson	gestur@odr.is
Ráðgjöf vegna leyfisveitingar	VSÓ	Ráðgjafi, efnaverkfræðingur	Bryndís Skúladóttir	bryndis@vso.is

3. Rannsóknarsvæði

Hvalfjörður var valinn sem staðsetning fyrir rannsóknir á aukinni basavirkni sjávar eftir nokkurra mánaða mat á nokkrum fjörðum á Íslandi gagnvart skilyrðum sem sett voru til að hámarka vísindalega þekkingu og einnig að tryggja að öryggiskröfur og ábyrgð væru viðhöfð við rannsóknina.¹² Frekari leiðsagnar var aflað með viðtölum við 14 vísindafólk sem bæði eru og eru ekki hluti af netverki styrkþega Carbon to Sea. Vísindafólkið taldi til allmarga þætti sem gerðu staðsetninguna hentuga svo sem:

1. Skýlt **umhverfi** fjarðarins leiðir af sér að straumkerfi er fyrirsjáanlegt sem einfaldar líkanavinnu. Jafnframt er viðstöðutími sjávar í firðinum nægilega langur til að basi haldist í firðinum nægilega lengi til að framkvæma mælingar en einnig berst inn ferskur sjór til þess að grunnástand náist aftur.
2. Ákjósanleg **veðurskilyrði** fyrir loftskipti milli lofts og sjávar vegna sterkra vinda sem einkenna fjörðinn.
3. **Takmörkuð áhætta** á árekstrum við aðra starfsemi og forðast skyldi svæði þar sem hrygning á sér stað eða sem er búsvæði viðkvæmra tegunda.

¹² Boettcher et al, 2023

4. Hagkvæm staðsetning nærri skipaflutningum, bryggju og rannsóknastofuinnviðum.

Hvalfjörður féll að þessum upphafsskilyrðum sem voru staðfest af tveimur verkfræðistofum sem hafa sérþekkingu á strandsvæðum (Vatnaskil og Efla) og staðfest með tveimur heimsóknum rannsóknateymisins og samtölum við haghafa í firðinum.

3.1. Staðarlýsing

Árið 2023 fjármögnuðu Rösti sjávarrannsóknasetur og Carbon to Sea Initiative tvö mikilvæg verkefni til að dýpka skilning á aðstæðum í Hvalfirði:

- árslanga grunnrannsókn framkvæmda af Hafrannsóknastofnun til að lýsa eðlisfræðilegum, lífefnafræðilegum og líffræðilegum stærðum fjarðarins
- þróun á svæðisbundnu haflíkani, framkvæmda af [C]Worthy til að koma á fót eðlis- og lífefnafræðilegu sjávarlíkani með hárra upplausn.

Þessi tvö verkefni hafa gefið mikilvægar upplýsingar um einkenni fjarðarins, sem mun gera Hvalfjörð að einum best rannsakaða firði á Íslandi þegar verkefnunum lýkur.

Hvalfjörður er um 35 km langur, 3,5 km breiður og 15-50 metra djúpur. Flæðið í firðinum einkennist af innflæði á dýpi og útlæði við yfirborð. Til viðbótar er rangsælis straumakerfi í firðinum þannig að innflæði er aðallega sunnan megin fjarðarins og útlæðið er í hámarki með norðurströndinni. Munur flóðs og fjöru er 1,5 m á lágstreymi og 3,5 m á stórstreymi (mælt með sjávarhæðarmæli við Grundartanga). Yfirborðshitastig fjarðarins er frá um 0°C um veturinn og að um 10°C um sumarið. Meðalseltan er 33 til 34 með nær engri lagskiptingu um veturinn en einhverri lagskiptingu (þar sem munur á seltu getur verið allt að 1 milli yfirborðs og botns) frá apríl til október, sérstaklega nærri þeim stöðum þar sem ár falla til fjarðarins. Hafefnafræðin einkennist af styrk heildar basavirkni frá um 2300 $\mu\text{mol/kg}$ (~2360 mmol/m^3) og uppleysts ólífræns kolefnis um 2100 $\mu\text{mol/kg}$ (~2155 mmol/m^3). Styrkur næringarefna er á bilinu 2-8 $\mu\text{mol/L}$ af NO_3 , 0,5 $\mu\text{mol/L}$ af PO_4 , og 4 $\mu\text{mol/L}$ af SiO_2 .

Í Hvalfirði eru litlar veiðar úr vistkerfi botnsjávar og takmarkaðar uppeldisstöðvar fyrir þorskungviði en uppsjávarfiskistofnar svo sem síld hafa tilviljunarkennda viðveru (sjá viðauka III). Í Hvalfjörð renna nokkrar laxár, m.a. Botnsá, Brynjudalsá, Laxá í Kjós og Bugða.

Mikið er til af gögnum til að gera nákvæma lýsingu á firðinum þar með talið víðtæk söfnun grunngagna um efna-, eðlis- og líffræðilega eiginleika sem Hafrannsóknastofnun framkvæmir fyrir Rösti (sjá viðauka IV).

Svæðisbundna sjávarlíkanið sem var þróað af [C]Worthy er byggt á ROMS (e. Regional Ocean Model System). Líkanið var stillt með raungögnum og getur hermt hringstreymi og hringrás

kolefnis og næringar í firðinum. Upplausn líkansins er þrepaskipt, þar sem nákvæmasta upplausnin er 33 m. Lífefnafræðilegur hluti líkansins byggir á Marine Biogeochemistry Library, MARBL sem er fyrsta flokks tækni til að herma viðbrögð við aukinni basavirkni (sjá nánar í viðauka V).

3.2. Verndarsvæði

Í Hvalfirði eru alþjóðlega mikilvæg fuglasvæði sem og svæði á C-hluta Náttúruminjaskrár og á lista Náttúrufræðistofnunar um tillögur að svæðum á B-hluta Náttúruminjaskrár (sjá mynd 1).

Þrjú alþjóðlega mikilvæg fuglasvæði eru í Hvalfirði:

- I. Svæði nr. FG-V 6 Hvalfjörður
- II. Svæði nr. SF-V 5 Andríðsey
- III. Svæði nr. FG-V 5 Kjalarnes

Náttúruminjaskrá skiptist í þrjá hluta:

A-hluti Náttúruminjaskrár er skrá yfir friðlýst og friðuð svæði. Engin svæði í Hvalfirði eru á A-hluta Náttúruminjaskrár.

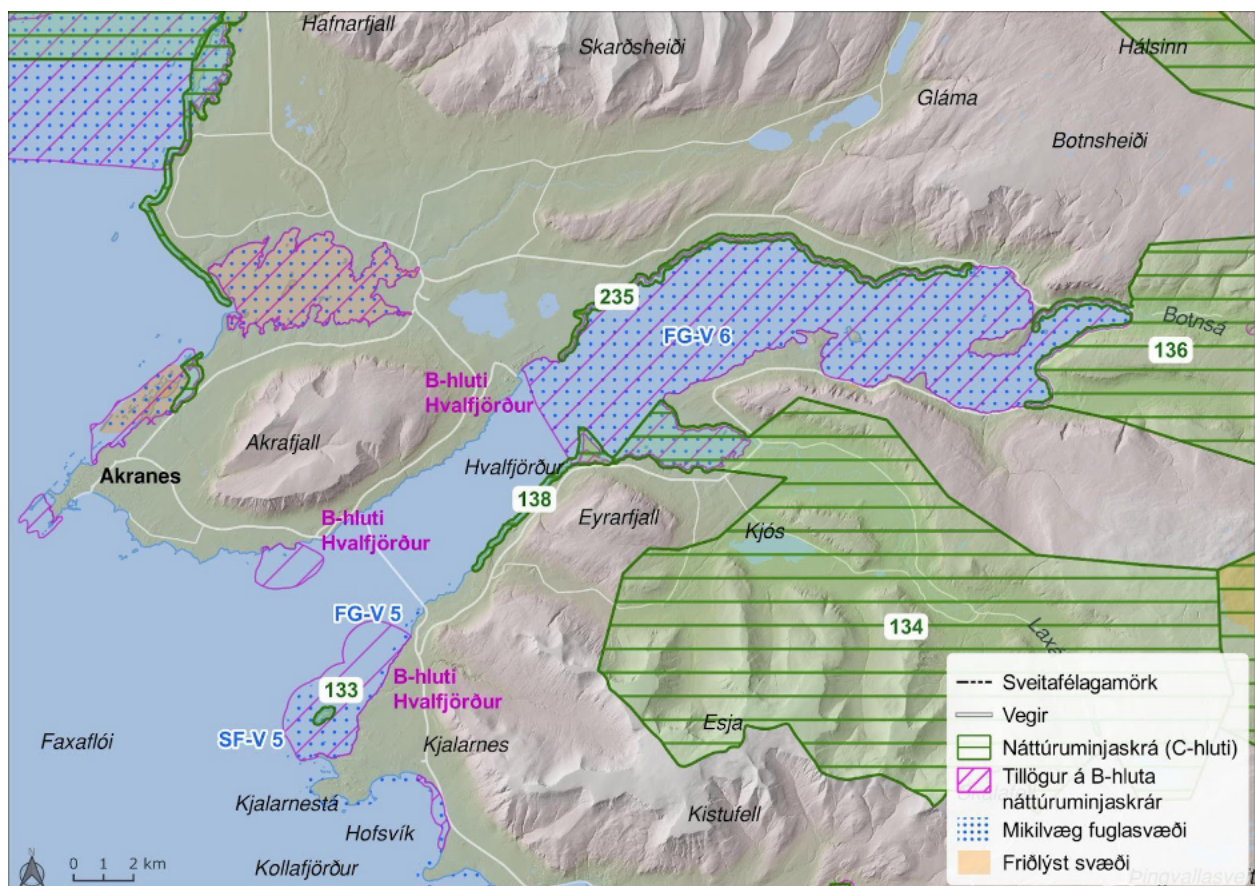
B-hluti Náttúruminjaskrár er framkvæmdaáætlun um friðlýsingar og friðun. Náttúrufræðistofnun hefur lagt fram tillögur um svæði á B-hluta sem ekki hefur verið staðfest. Á B-hluta er svæðið Hvalfjörður ásamt hólum og fjörum, frá botni og út að Grundartanga að norðan og Hvalfjarðareyrar að sunnan. Svæðið nær jafnframt yfir Andríðsey, Eyjasker og Nónsker með 1 km jaðarsvæði til sjávar. Svæðið er því þrískipt, þ.e. innri hluti Hvalfjarðar og tvö svæði við minni fjarðarins.

C-hluta Náttúruminjaskrár er skrá yfir aðrar náttúruminjar sem þykir ástæða til að friðlýsa eða friða. Í Hvalfirði eru eftirfarandi svæði skráð á C-hluta.

- I. Svæði nr. 133. Andríðsey. Mikið fuglalíf, mesta varpeyjan við sunnanverðan Faxaflóa.
- II. Svæði nr. 134. Laxárvogur og Laxá í Kjós. Í Laxárvogi eru víðáttumiklar leirur með fjölbreyttu dýralífi og gróðri. Laxá er ein helsta laxveiðiá landsins. Í sefunum er fjölskrúðugt fuglalíf.
- III. Svæði nr. 136. Brynjudalur, Botnsdalur, Hvalvatn og Glymur. Fagrir dalir, töluverður kjarrgróður. Mjög lífauðugar leirur, mikið fuglalíf. Glymur, hæsti foss landsins, er í Botnsá.
- IV. Svæði nr. 138. Ósmelur og Hvalfjarðareyri. Ósmelur er stór og fagur jökulgarður frá síðjökultíma. Meðfram ströndinni eru jarðlög með fornskeljum. Hvalfjarðareyri er fundarstaður baggalúta. Svæði í nánd við þéttbýli með mikið útivistar- og fræðslugildi.

- V. Svæði nr. 235. Hvalfjarðarströnd, Hvalfjarðarstrandarhreppur, Borgarfjarðarsýsla. Þar er fögur strandlengja með fjölbreyttu landslagi og ríku fuglalífi.

Ólíklegt að rannsóknin hafi áhrif á fuglalíf á fuglaverndarsvæði eða náttúru á svæðum á náttúruminjasrá. Efnin verða losuð í skamman tíma, í litlum styrk og þau þynnast hratt í sjávarstraumum. Fjaran, sem er um 300 m frá losunarstað, er á C-hluta Náttúruminjasrá. Samkvæmt líkanagerð verður sýrustig sjávar nálægt bakgrunnsgildi innan við 200 metra frá losunarstað (sjá kafla 5, 6 og viðauka XI). Í áhættumati var horft til dýralífs og viðbragðsáætlun tekur til atvika sem varða m.a. fugla.



Mynd 1: Verndarsvæði í Hvalfirði

Staðsetning rannsóknar

Röst hefur fengið leyfi frá Olíudreifingu ehf. til að nýta bryggju í þeirra rekstri sem staðsett er norðaustanmegin í Hvalfirði. Bryggjan nær um 300 metra út í fjörðinn en á þeim stað er dýpi um 15 metrar á fjöru. Að jafnaði var bryggjan notuð einu sinni til tvisvar á ári fyrir 2020 en hefur ekki verið notuð síðan þá og það er ólíklegt að breytast á næstu árum. Lítil hætta er því á skörun við aðra notkun á bryggjunni en rannsóknabúnaðinn er auðveldlega hægt að fjarlægja með stuttum fyrirvara. Með því að nota núverandi innviði er hægt að framkvæma rannsóknir með lágmarks áhrifum og truflunum í firðinum. Fyrir utan tækjabúnað sem notaður verður við rannsókna á bryggjunni verða gerðar hágæðamælingar á sjávarsýnum nálægt bryggjunni en einnig lengra úti í firðinum frá upphafi og þangað til losunin hefur átt sér stað og um tvær vikur á eftir (sjá nánar í kafla 5 um mælingar og vöktun).

4. Tímalína og undirbúningur rannsókna

4.1. Tímalína

Í firðinum er hófleg lagskipting vegna seltu yfir sumarmánuðina eða frá apríl til október. Þessi lagskipting er mest áberandi á um 10 m dýpi norðanmegin í firðinum. Til viðbótar eru breytingar á hita með dýpi allt að 1,5°C norðanmegin. Lagskipting í vatnssúlunni mun hjálpa til við að halda basaviðbótinni nærri yfirborði sjávarins, sem getur leitt til þeirra breytinga á karbónatkemíu sem eykur loftskipti CO₂ milli lofts og sjávar (CDR). Tímalína rannsókna er því sú að framkvæma litarefnisrannsókn í maí sem undirbúningsskref til að kortleggja dreifinguna fyrir basavirknirannsóknina sem áætluð er í júlí. Júní yrði þá nýttur til að fínstillast losunaráform í samræmi við niðurstöður litarefnisrannsóknar og nærsvæðislíkans.

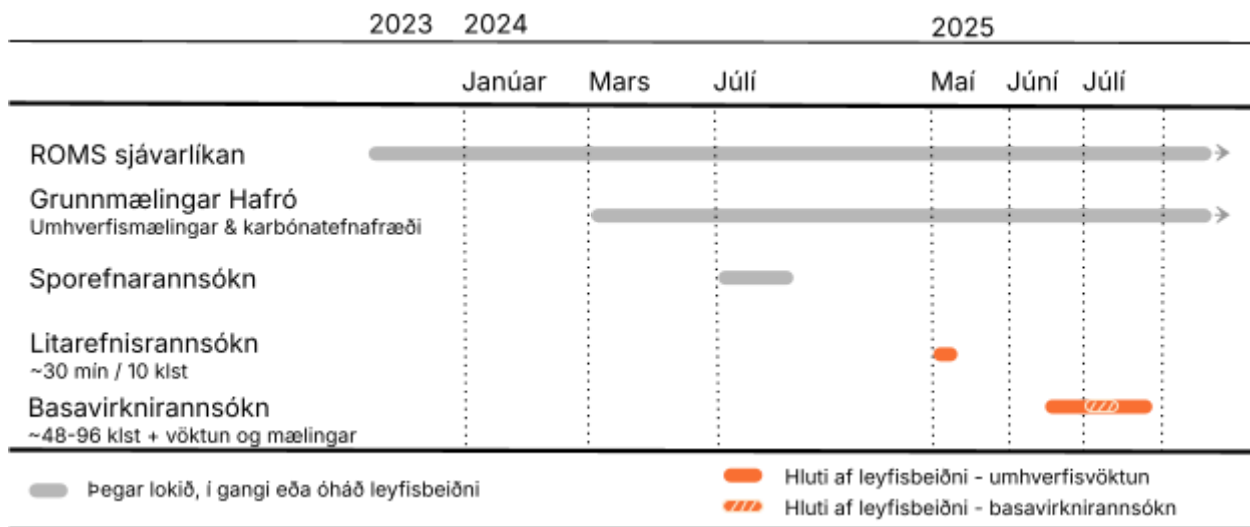
Maí 2025

Rannsóknin með flúrljómandi litarefni er áformuð snemma í maí 2025 (sjá nánar í næsta kafla). Þessi rannsókn mun taka u.þ.b. einn dag. Losunin á litarefninu mun taka um 30 mínútur. Litarefnið verður sjáanlegt í nokkrar klukkustundir og verður kortlagt með hnitsettum myndum sem teknar verða með dróna og einnig mælt með flúrljómunarmæli sem verður beitt frá kajak eða með sjálfvirku yfirborðsfari (e. Autonomous Surface Vehicle, ASV). Þessi gögn munu hjálpa til við að staðfesta þær forsendur um dreifingu sem líkanið hefur nærri losunarstaðnum.

Júlí 2025

Basavirknirannsóknin, þar sem áætlað er að rannsaka áhrif natríumhýdroxíðs (NaOH) á loftskiptin og umhverfispætti, ásamt sporefni (SF₆) og flúorljómandi litarefni, er áætluð um miðjan

júlí 2025. Tímabil losunar er áætlað um 48-96 klukkutímar. Vöktun á umhverfinu verður fyrir, á meðan og eftir losun. Gert er ráð fyrir að basavirkni aukist á nærsvæði losunarinnar á meðan á losuninni stendur og að hægt verði að mæla basavirknina á hóflegu svæði í norðurhluta fjarðarins umhverfis olíubryggjuna. Eftir að losun lýkur er búist við því að basavirkni nái bakgrunnsgildum u.þ.b. 24-48 klukkustundum.



Mynd 2: Tímalína fyrri og fyrirhugaðra rannsókna.

4.2. Yfirlit undirbúningsrannsókna

Til að hanna sannfærandi og áhrifamikla rannsókn var farið í nákvæma skoðun á sérstæðum eiginleikum fjarðarins sem einnig tók til þeirra takmarkana sem eru fyrir hendi, þetta fól m.a. í sér:

1. **Eiginleikar rannsóknarstaðar** (heimildavinna, 2023-2024): Að byggja þekkingargrunn á staðháttum og sagnfræðilegu samhengi staðarins. Niðurstöðunum er lýst í kafla 3 og í viðaukum III og IV.
2. **Grunnrannsókn á umhverfinu** (2024-2025): Útvegar grundvallarþekkingu á eðlisfræði-, efnafræði- og líffræðilegum einkennum rannsóknastaðarins yfir eitt ár, sem framtíðarbreytingar geta verið bornar saman við og metnar. Grunn gagnanna er aflað af Hafrannsóknastofnun. Sjá viðauka IV.
3. **Svæðisbundið haflíkan** (2023-2025): Líkanið skilgreinir eiginleika flæðis í firðinum, útvegar magnbundið mat til að nota við áætlanagerð um losun á basa, gerir spár um upptöku CO₂ með tíma og byggir upp og bætir svo í sífellu umgjörðina fyrir samanagerð líkanniðurstaðna og mælinga til að hjálpa við að sannreyna haflíkon sem verkfæri til að

vakta, skrásetja og sannreyna (e. monitoring, reporting and verification, MRV) CDR í sjó. Sjá viðauka V og X.

4. **Rannsókn með tvöföldu sporefni (2024):** Útvegaði gögn til að sannreyna líkan sem líkir eftir dreifingu efna í firðinum og einnig gögn um loftskipti milli lofts og sjávar til að styðja við útreikninga á magni í framtíðar CDR. Sjá viðauka VI.
5. **Blöndunarlíkan nærri losunarstað (2024):** Vatnaskil hefur unnið með rannsóknarteymi í að þróa nærsvæðis blöndunarlíkan fyrir losunarstaðinn. Blöndunarlíkanið hjálpar við að skilgreina dreifinguna, tímann, magn og losunarhraða nærri þeim punkti sem losað er frá. Sjá viðauka VIII.

Nánari upplýsingar um nálgunina, niðurstöður og aðferðafræði er að finna í viðaukunum.

4.3. Söfnun grunngagna

Söfnun grunngagna er framkvæmd af Hafrannsóknastofnun til að styðja við víðari skilning á möguleikum á áhrifum OAE fyrir CDR í sjó. Þessar rannsóknir eru mjög víðtækar grunnrannsóknir fyrir OAE vettvangsrannsóknir og samanstanda af 15 mánuðum af athugunum á eðlisfræði, karbónatkemíu, líffræði og vistkerfum botns og uppsjávar í Hvalfirði. Mælingar eru gerðar á stöðvaneti með 12 stöðvum á sniðum sem ganga þvert á fjörðinn (sjá nánar í töflu 1 og viðauka IV) á mismunandi dýpum. Útsetning tækjabúnaðar byrjaði í mars 2024 og var fyrstu gagna aflað í apríl 2024 áður en vorblóminn hófst og áætlað er að athuganir standi yfir þar til í maí 2025. Athuganirnar eru gerðar frá bát/skipi, með mælibúnaði sem festur er við botn og með fjörükönnunum.

Tafla 1: Yfirlit um þær mælistærðir sem mældar eru í grunnrannsókninni. Nánara yfirlit um allar mælingar að meðtöldum staðsetningum og tíðni er gefið í viðauka IV.

Flokkur	Mælistærðir
Eðlisfræði	Selta, hiti (með CTD), Súrefni, ADCP
Karbónatkemía	pH, hlutþrýstingur CO ₂ (pCO ₂), Heildar basavirkni (TA), Uppleyst ólífrænt kolefni (DIC)
Líffræði	Næringarefni, Flúrljómun (fyrir blaðgrænu) PAR, Samsetning svífpörungasamfélags á ákveðnum dýpum
Vistkerfi botnsins	Botnfiskar og epibenthic fauna (hryggleysingar), ífána, stórpörungar, kalkpörungarbreiður og umhverfisDNA (eDNA)

Vistkerfi uppsjávar

Dýrasvíf (mesoscale, ljósáta, amphipods), uppsjávarfiskar
(aldurs-lengdarsambönd, magn)

Að auki hefur Röst komið fyrir $p\text{CO}_2$ og CTD mælitækjum á olúbryggjunni sem gefa grunngögn umhverfis losunarstaðinn. Tækin voru sett upp í október 2024. Þó að þessi mælistærð sé álitinn grunnþáttur þá er þessi mæling utan þess sem Hafrannsóknastofnun ber ábyrgð á.

5. Lýsing rannsókna

5.1. Rannsóknarspurningar

Svæðisbundna haflíkanið sem var þróað fyrir Hvalfjörð gefur til kynna að það að bæta basa í fjörðinn muni auka basavirkni hans og fjarlægja CO_2 án neikvæðra áhrifa á staðbundnar tegundir og samfélög. Með rannsóknunum er ætlað að staðfesta þessa kenningu með því að framkvæma mælingarnar sem útlistaðar eru í lok þessa kafla. Markmiðið er að meta hvort að hægt er að greina breytingar sem koma til viðbótar við náttúrulegan breytileika í firðinum. Rannsóknateymið vonast til að fá svör við fjórum rannsóknarspurningum:

1. Er hægt að auka basavirkni sjávar á litlu svæði í firðinum í takmarkaðan tíma með því að bæta við NaOH?

Með því að nota svæðisbundna haflíkanið er hægt að reikna hve mikla breytingu á basavirkni og $p\text{CO}_2$ má búast við í firðinum byggt á því magni af basa sem áætlað er að losa. Með mælingum er hægt að meta útreikninga líkansins og álykta um hvort viðbótin af NaOH auki basavirkni í firðinum umfram náttúrulega breytileikann.

2. Getur aukning á basavirkni lækkað $p\text{CO}_2$ við yfirborð sjávar?

Mælingarnar munu hjálpa við að svara hvort að viðbót af basa leiði til lækkunar á $p\text{CO}_2$ við yfirborð sjávar. Lækkun á $p\text{CO}_2$ við yfirborð sjávar er undanfari fyrir mögulegt CDR úr andrúmsloftinu. Athuganir á $p\text{CO}_2$ verða notaðar til að sannreyna niðurstöður líkanreikninga. Frekari greining mun einblína á þau skilyrði sem þurfa að vera til staðar svo að viðbót af NaOH geti lækkað $p\text{CO}_2$ við yfirborð sjávar og hvernig þetta breytist þegar basinn berst frá losunarstaðnum um fjörðinn.

3. Mun lækkun á $p\text{CO}_2$ við yfirborð sjávar leiða til CDR?

CDR er ekki hægt að mæla með beinum hætti og verður því sannreynt með líkani. Til þess að lækkun á $p\text{CO}_2$ við yfirborð sjávar leiði til CDR verður rannsóknin að sýna fram á að sjórinn sem hefur aukna basavirkni og lækkað $p\text{CO}_2$ sé nægilega lengi í tengslum við andrúmsloftið. Hraðinn sem það tekur að ná jafnvægi milli yfirborðs sjávarins og andrúmsloftsins er háður nokkrum mikilvægum þáttum, þar með töldum grunnkarbónatkemíu sjávar, þykkt blandaða lagsins við yfirborð og áhrifa vinds. Til þess að sýna fram á að lækkun $p\text{CO}_2$ við yfirborð geti leitt af sér CDR þurfa mælingar að gefa til kynna að líkanið sé nákvæmt og mælingar á $p\text{CO}_2$ og SF_6 sporefnismælingarnar að sýna að sjórinn með auknu basavirknina hafi samfellda viðveru við yfirborð.

4. Verða staðbundnar tegundir og náttúruleg samfélög fyrir áhrifum vegna NaOH viðbótarinnar - og ef svo er hver eru áhrifin?

Metið verður hvort áhrif á staðbundnar tegundir og náttúruleg samfélög séu greinanleg. Könnuð verða hugsanleg áhrif af breytingum á karbónatkemíu á fjölbreytta flokkunarfræðilega hópa, metin næmni og stöðugleiki þessara áhrifa.

5.2. Rannsókn með flúrljómandi litarefni

Til undirbúnings fyrir losun NaOH er lagt til að herma basatilaunina með því að nota vistfræðilega skaðlaust litarefni.¹³ Tveir lítrar af Rhodamine WT (sem 20% lausn) verða blandaðir við sjó úr firðinum til að fá 1000 L af lausn í tank. Þessir 1000 L verða losaðir með flæðihraðanum 30 L/min í gegnum basadælukerfið (sjá neðar) sem leiðir til þess að losunin mun taka u.þ.b. 30 mínútur og mynda þannig sjáanlegt merki í fáeinar klukkustundir nálægt bryggjunni og í áttina að fjarðarmynninu. Athuganir á dreifingu litarefnisins verða gerðar með því að nota hnitsettar drónamyndir og in-situ mælingar með flúrljómunarmæli og GPS þar sem notaður verður kajak eða yfirborðsfar (ASV).

Athuganirnar sem fást í þessari litarefnisrannsókn munu veita upplýsingar fyrir nærsvæðislíkanið á losunarstað. Þetta skiptir máli til að samþættingar við og sannreyningu á líkaninu sem mun aðstoða við að meta af nákvæmni hraðann sem þarf að vera á NaOH losuninni til að hún uppfylli þau skilyrði að viðhalda öruggum pH mörkum. Þar sem flúrljómandi litarefnið er sjáanlegt með berum augum mun þessi losun einnig gefa rannsóknateyminu mikilvægar upplýsingar um hvar þarf að taka sýni þegar NaOH verður losað á næsta stigi.

¹³ Clark et al, 2014, Ho et al, 2006

Rhodamine

Rhodamine WT er skaðlaust flúrljómandi litarefni sem er algengt að nota til að rekja flæði vatns í gegnum jarðlög og brunna fyrir drykkjarvatn. Í umhverfisvísindum er það notað til að rannsaka flæðimynstur og dreifingu í ám, jöklum, ísbreiðum, strandsjó og fráveituvatni. Það er umhverfislega öruggt litarefni sem deyfist eftir fáeinar klukkustundir vegna þynningar. Það gefur viðtakanum bleikan lit en þynningin mun gera það ósýnilegt eftir nokkrar klukkustundir.

Tafla 2: Mælistærðir í rannsókn með flúrljómandi litarefni.

Eiginleikar lausnar	20% lausn (fáanleg frá framleiðanda)
Lengd tímabils	30 mínútna losun, 1 dagur af athugunum
Heildarrúmmál	2 L litarefni, 1000 L lausn
Flæðihraði	30 L/mín
Rök fyrir magni	Gert eftir bestu leiðbeiningum ¹⁴
Tækjabúnaður fyrir losun	Dreifistútur festur við bryggju
Sýnileiki	Sjáanlegt í nokkrar klukkustundir, greinanlegt með flúrljómunarmæli í allt að 10 klukkustundir

5.3. Rannsókn á viðbót basa með því að nota NaOH, SF₆ og flúrljómandi litarefni

Eftir að nærsvæðis blöndunarlíkanið hefur verið kvarðað með niðurstöðunum úr litarefnisrannsókninni verður natríumhýdroxíð (NaOH) losað í fjörðinn (truflun á basavirkni). Efnahvörfin sem þetta veldur eru listuð í smáatriðum í viðauka I. Breytingarnar á hafefnafræði verða raktar með því að nota mælingar sem gerðar eru frá bryggjunni, skipum með tækjabúnað og af starfsfólki til að safna sýnum til mælinga á karbónatkemíu. Mælingaráætlunin er unnin samkvæmt kvarðaða ROMS líkaninu, en einnig verða umhverfisleg áhrif vöktuð.

Þar sem viðbótin af basanum er ósýnileg verður Rhodamín WT litarefni og sporefnninu SF₆ (sem er lofttegund) losað samhliða NaOH. Litarefnið hjálpar til við framkvæma sýnatökur á nærsvæði dælingarinnar og gasgreini sem getur mælt SF₆ á samfelldan hátt á siglingaleið verður komið

¹⁴ Ho et al, 2006

fyrir á rannsóknarskipinu.¹⁵ Þannig verður fylgst með því hvernig sjórinn sem blandaður er basanum dreifist um fjörðinn.

SF₆

Brennisteinshexaflúoríð (SF₆) er efnafræðilega óhvarfgjörn lofttegund sem algengt er að nota sem sporefni í haffræði. SF₆ er öflug gróðurhúsalofttegund en losunin í þessari rannsókn er um ~128 grömm af SF₆, sem er hverfandi hluti af þeim meira en 8 milljörðum gramma sem losuð eru árlega frá háspennuvirkjum. Þetta magn af SF₆ jafngildir um 3200 kg af CO₂ sé horft til gróðurhúsaáhrifa þeirra svo að það er lítil viðbót við heildarkolefnisfótspor rannsóknarinnar þar sem eldsneyti til ferða og flutninga er stærsti þátturinn.

Natríumhýdroxíð, NaOH

Natríumhýdroxíð er basískt salt sem verður afhent sem vatnslausn. Þetta er eitt af þeim basísku efnasamböndum sem hægt er að nota við CDR í sjó sem lofar hvað bestu. Hýdroxíð jónin mun hliðra karbónat jafnvæginu að meira basískum skilyrðum og gera þannig kleift að fjarlægja CO₂ úr andrúmsloftinu. Natríum er algengasta katjónin í sjó. Fyrir prófanirnar í rannsókninni verður NaOH aflað í 30% styrk til að lágmarka rúmmálið. Ferskvatni verður síðan bætt í blönduna til þynningar. Í 30% styrk er blandan ætandi og viðeigandi ráðstöfunumverður beitt við meðhöndlun þess (sjá Öryggisráðstafanir og viðbragðsáætlun í kafla 6).

Tafla 3: Losunarstærðir í rannsókn á viðbót basa.

	NaOH (basi)	SF ₆ (óhvarfgjörn sportegund)	Rhodamín (litarefni)
Eiginleikar lausnar	4,5% NaOH lausn	SF ₆ uppleyst í ferskvatni	20% lausn (fáanleg frá framleiðanda)
Lengd tímabils	2-4 dagar af samfelldri losun		
Heildarmagn	Allt að 30 IBCs = 30 m ³ af 30% NaOH lausn sem þynnt verður með ~168.000 L af ferskvatni og endar í ~198.000 lítrum af 4.5% NaOH lausn	128 g af SF ₆ leyst upp í 4000 L af vatni	2 L litarefni, 1000 L lausn
Flæðihraði	30-60 L/min	0,7 L/min	

¹⁵ Ho, 2002

Rök fyrir magni	Byggt á líkanreikningum	Gert eftir bestu leiðbeiningum ¹⁶	Gert eftir eftir bestu leiðbeiningum ¹⁷
Tækjabúnaður fyrir losun	Dreifikerfi við bryggju		
Sýnileiki	Ósýnilegt, verður rakið með SF ₆ mælingum, basinn sem bætt er við verður greinanlegur í ~24 klst eftir að losun lýkur.	Ósýnilegt, greinanlegt með rannsóknatækjum í tvær til þrjár vikur	Sjáanlegt í nokkrar klukkustundir, greinanlegt með flúrljómunarmæli í allt að 10 klukkustundir

5.3.1. Rök fyrir magni af basa sem notað verður í rannsókn

Í rannsókninni er áætlað að nota að hámarki 30.000 L af 30% NaOH lausn, sem að auki verður blönduð ferskvatni til að ná réttri eðlisþyngd. Stefnt er að því að þynnta lausnin sé í kringum 4,5% NaOH og með eðlisþyngd nálægt 1050 kg/m³. Til þess að ná þynningunni verður u.þ.b. 168.000 L af ferskvatni blandað við 30% NaOH lausnina. Flæðihraðinn á blandaðri lausn verður um það bil 30-60 L/mín. Lokamagnið sem losað verður, hraðinn og tímalengdin á losuninni eru háðar nánari greiningu á niðurstöðum frá líkönum af blöndunarsvæðinu nærri losunarstað og litarefnisrannsókn sem áætluð er í maí 2025.

Heildarmagn basa sem áætlað er að nota í rannsókninni var reiknað út með því að nota svæðisbundna líkanið og byggir á nokkrum meginþáttum:

1. Mögulegt sé að nema merki breytinganna miðað við bakgrunnsgildi.
2. Mögulegt sé að framkvæma allar þær sýnatökur og mælingar sem þarf til að svara rannsóknarspurningunum.
3. Að unnið sé innan umhverfislega öruggra aðstæðna svo sem EC50 takmarkana (sjá viðauka IX og XI).

Möguleiki til að nema breytingar

Það er mikilvægt að geta mælt breytingar til að ákvarða hvort að viðbótin af NaOH eykur basavirkni í firðinum. Hvort mögulegt sé að nema breytingarnar er að stærstu leyti ákvarðað af breytileika í bakgrunnsgildum, þ.e. hvenær ekki er lengur fært að tengja á skýran hátt frávik í basavirkni í firðinum til NaOH losunarinnar.

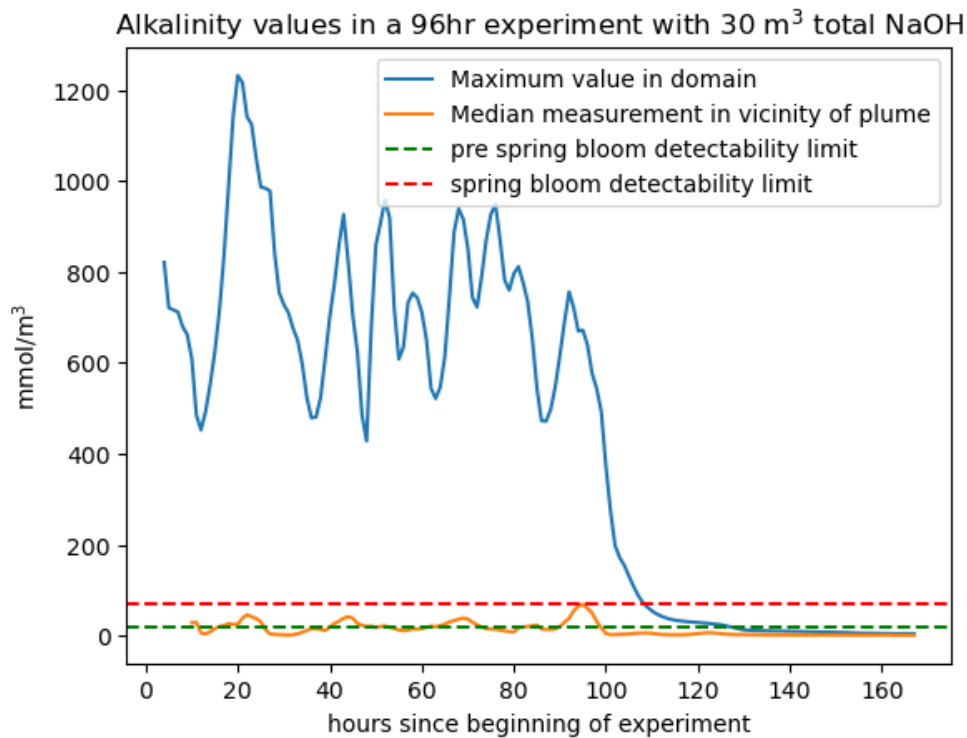
¹⁶ Ho et al, 2002, Ho et al, 2009

¹⁷ Ho et al, 2006

Til að meta þennan breytileika í bakgrunninum er byggt á mælingum úr grunnrannsókninni sem gerð er af Hafrannsóknastofnun. Gagnasöfnunin hófst í apríl 2024 og stendur enn, en Hafrannsóknastofnun mælir heildarbasavirkni á nokkrum stöðvum í Hvalfirði. Skilgreind eru þau mörk þar sem mögulegt er að greina breytingar á basavirkni sem 20 mmól/m³ áður en vorblóminn hófst (apríl) og 75 mmól/m³ meðan svifþörungablóminn var í hámarki (júní). Með hliðsjón þar af er stefnt á að valda breytingum þannig að frávik í basavirkni haldist samfellt yfir 75 mmól/m³ meðan losunin varir. Þegar gögn frá júlí 2024 berast frá Hafrannsóknastofnun verður hægt að endurskoða þessi gildi og stilla líkanið af, ef nauðsynlegt er. Aðferðafræðin fyrir útreikninga á basavirkni í bakgrunninum er að finna í viðauka VII.

Á mynd 3 hér að neðan er sýnd hámarks viðbótar basavirkni í líkaninu sem fall af tíma, þar sem þau greiningarmörk upp á 20 mmól/m³ og 75 mmól/m³ sem fyrr hefur verið lýst eru afmörkuð með brotnum línum. Hámarksgildið sveiflast vegna breytileika í sjávarföllum í firðinum á meðan losun stendur yfir. Hámarksgildið lækkar hratt eftir að losun lýkur þannig að hámarksgildi nær aftur bakgrunnsgildum á u.þ.b 24 klukkustundum eftir að losun lýkur. Einnig gefur þetta til kynna að hámarksgildi yfir heilan sjávarfallahring nái nokkurskonar jafnvægi og bendir til þess að viðbót á basa jafnist út við dreifingu af völdum strauma og blöndunar.

Miðað við núverandi upplýsingar telur rannsóknateymið að nauðsynlegt sé að losa 30m³ yfir 96 klukkustundir til þess að viðhalda stöðugu gildi fyrir ofan greiningarmörkin í bakgrunninum í nógu langan tíma til þess að það sé hægt að framkvæma allar mælingar, taka nauðsynleg sýni og staðfesta breytingarnar sem eiga sér stað. Niðurstöður úr litarefnisrannsókninni verða notaðar til að fínstilla losun (magn, hraða, tímabil) og meta betur lágmarksmagnið sem þarf til þess að hægt sé að framkvæma rannsóknina. Leyfisveitendur verða látnir vita ef kemur í ljós að hægt að er að nota minna magn.



Mynd 3: Hámarks viðbótar basavirkni (reiturinn þar sem styrkur basavirkinnar er hæstur, metið fyrir hverja klukkustund) sem fall af tíma fyrir losun á 30m³ af 30% NaOH lausn, þynntri í losun yfir 96 klukkustunda tímabili.

Fínstilling með því að nota blöndunarlíkan fyrir losunarsvæðið

Til að stuðla að sem bestum skilningi á því hvernig losunarstrókurinn (e. plume) muni hegða sér var gerður samningur við verkfræðistofuna Vatnaskil til að útbúa blöndunarlíkan fyrir losunarsvæðið í hárri upplausn. Þetta líkan verður notað til:

- Að hámarka losunarferlið fyrir NaOH (heildarrúmmál, tíma, flæðihraða) þannig að pH haldist innan þeirra marka sem sett eru í reglugerðum eða innan annarra skilyrða sem leyfisveitendur kunna að setja.
- Að besta losunarferlið fyrir NaOH þannig að sjórinn sem tekur við NaOH haldist eins nærri yfirborði og mögulegt er.
- Veita upplýsingum inn í mælingaráætlunina fyrir karbónatkemíu (staðsetningar þar sem sýni gætu verið tekin eða þar sem mælitæki gætu verið staðsett).

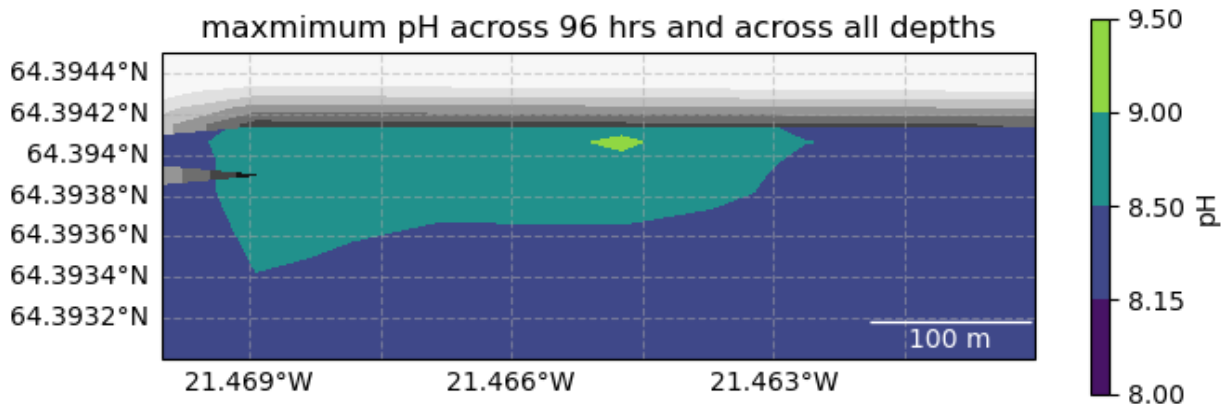
Samkvæmt Vatnaskilum gefur blöndunarlíkanið nokkuð góða mynd af dreifingu NaOH frá því lausnin berst í gegnum losunarstútana að yfirborði og nær viðmiðunarstyrk. Ef horft er til

takmarkana líkansins þá er líklegt að niðurstöður líkansins vanmeti stærð dreifingarsvæðisins en ofmeti styrk og pH gildi. Því er hægt að hugsa um niðurstöður líkansins sem ákveðin efri mörk á styrk og pH gildi en þurfi að horfa á svæðisbundið haflíkan og litarefnisrannsókn til að skilja betur mörk dreifingarsvæðisins. Sjá viðauka VIII fyrir nánari lýsingar á líkaninu og niðurstöður úr hermumum.

5.3.2. Áætlað blöndunarsvæði

Samkvæmt niðurstöðum úr blöndunarlíkani á losunarstað er líklegt að strókur lausnarinnar muni ná jafnvægi á ~1 mínútu eftir að losun hefst og að upphafsblöndunarsvæði umhverfis losunarstúta sé með um 20 m radíus. Styrkur er mestur við losunarstúta á mjög litlu svæði (nokkrir sentimetrar) frá stútum en fellur síðan hratt. Líklegt er að efri mörk pH gilda við yfirborð séu um 10-11 en falli að bakgrunnsgildum við jaðra. Vert er að taka það fram að slíkum hápunktum er aðeins náð á litlu svæði í stutta stund en miðgildi eru töluvert lægri.

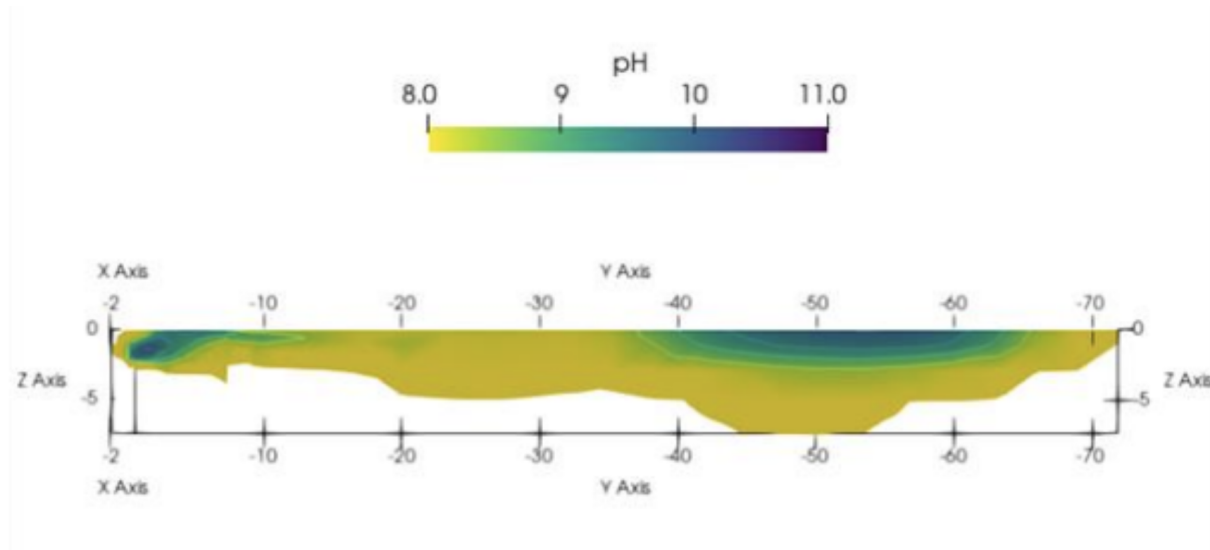
Samkvæmt niðurstöðum úr svæðisbundnu haflíkani er líklegt að aðeins megi greina pH hærra en 9 á 100m x 100m svæði umhverfis losunarstúta og á u.þ.b. 400m x 400m svæði megi mæla pH milli en 8,5 - 9.5. Vert er að taka fram að meðalgildi yfir sama svæði á öllum dýptum fer aldrei yfir 8,5 yfir allan losunartímann.



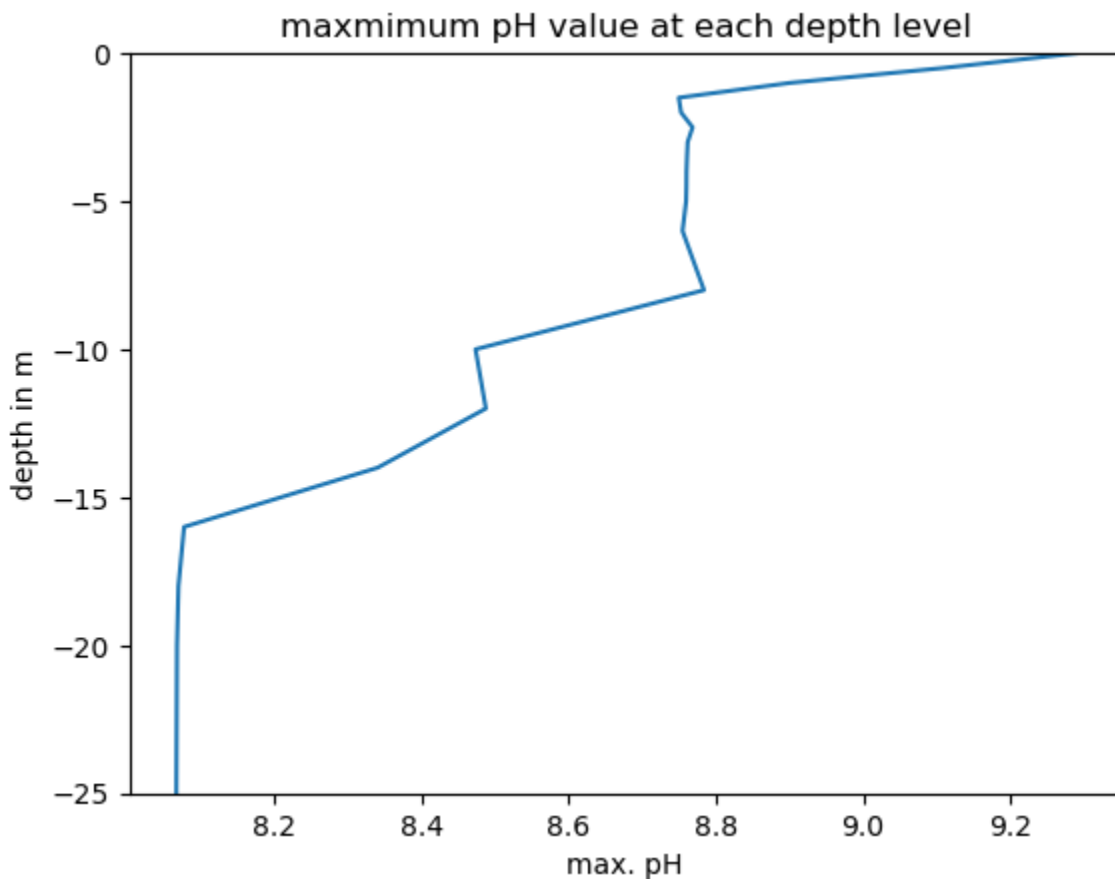
Mynd 4: Hámarksgildi á pH á hvaða dýpi sem er samkvæmt svæðisbundnu haflíkani sem hermdi losun 30 m³ af 30% NaOH, þynntu með ferskvatni í 4,5% lausn, sem stóð yfir í 96 klukkustundir. Athugið að svæðisbundna líkanið er með finustu nákvæmni 33m x 33m.

Þar sem blöndunarsvæðislíkanið var líklegt til að vanmeta stærðina á dreifingarsvæðinu er út frá þessu eðlilegt að uppfæra mat á upphafsblöndunarsvæðinu þannig að það sé með 50 m radíus frá losunarstútum.

Einnig er vert að geta þessi að öll veruleg frávik á pH má greina í efstu lögum, eða á dýpi 0-5m eins og sjá má á myndum 5 og 6.



Mynd 5: pH-gildi í sniði eftir 1 mínútu á 4.5% lausn. Styrkur er aðgreindur á stærðargráðubílum og jafngildislínur fyrir pH-gildi eru á 0,5 millibíli.



Mynd 6: Hámarksgildi á pH út frá dýpi samkvæmt svæðisbundnu haflíkani sem hermdi losun 30 m³ af 30% NaOH, þynntu með ferskvatni í 4,5% lausn, sem stóð yfir í 96 klukkustundir.

Samkvæmt hermunum úr staðbundnu svæðislíkani er líklegt að svæðið þar sem hægt er að nema mælanlega breytingu á basavirkni sé að hámarki með radíus 1 km frá losunarstað en utan þess er líklegt að aðeins sé hægt að greina sporefni.

Saman gefur þetta mynd 7 af áætluðu blöndunarsvæði. Niðurstöður úr litarefnisrannsókn í maí 2025 verða notaðar til að staðfesta og uppfæra áætlað mat á blöndunarsvæði.



Mynd 7: Áætlað böndunarsvæði rannsóknarinnar og líkleg hámarks- og meðaltalsgildi á pH innan svæða.

5.3.3. Lykilumhverfispættir

Vistkerfispættir sem vaktaðir hafa verið í svipuðum OAE rannsóknum eru súrefni, grugg (sem vísir á heildarmagn fastra efna í sviflausn) og pH við losunarstaðinn. Í þessari rannsókn verða þessi þættir vaktaðir, en auk þess er áhersla lögð á að vakta líffræðilega heilsu uppsjávar- og botnsjávarvistkerfa og tekið tillit til hugsanlegra áhrifa á plöntusvif, næringarefni og samfélög botndýra sem eru þeir gæðapættir sem lög um stjórn vatnamála nr. 36/2011 skilgreina. Sjá nánar kafla um mælingar og vöktun.

Tafla 4: Stytt yfirlit yfir þá líffræðilegu þætti sem fyrirfram er lagt til að vakta, fyrir, á meðan og á eftir að losunin á basanum er framkvæmd.

Flokkur	Mælistærð
Almenn umhverfisskilyrði	pH, uppleyst súrefni, grugg, heildarmagn svifagna
Samsetning plöntusvifs	Flow cytometry, blaðgrænusýni, flúrljómun
Samsetning botndýrasamfélaga	Greiparsýni

Áhrifamat á vatnshlot

Að ráðleggingum Umhverfisstofnunar hefur verið unnið mat á þeim áhrifum sem tímabundin losun (48-96 klukkustundir) vegna rannsóknar í Hvalfirði getur haft á líffræðilega, efna- og eðlisfræðilega gæðapætti þess vatnshlots sem losað er í og hvort áhrifin séu slík að þau gætu haft áhrif á umhverfismarkmið vatnshlotsins, sbr. Vatnaáætlun Íslands frá 2022-2027 og lög um stjórn vatnamála, nr. 36/2011. Í áhrifamatinu kemur fram að ekki verður séð að álag á vatnshlotið vegna rannsóknarinnar muni hafa þau áhrif að vatnshlotið falli um flokk. Því er metið að ástand vatnshlotsins verði áfram gott. Samkvæmt niðurstöðum úr líkönum og rannsóknum á vísindastofum er mjög líklegt að áætlað magn NaOH, styrkleiki og losunartími séu vel innan hættumarka fyrir lífverur (sjá nánar í viðauka XI).

5.3.4. Mælingar og vöktun

Til viðbótar við gögnin sem lýsa grunnástandi og sem safnað er af Hafrannsóknastofnun verður vöktun á umhverfinu gerð á mörgum sviðum haffræði (eðlisfræðileg, efnafræðileg, líffræðileg) á undan, á meðan og á eftir losnina. Þessi vöktun samanstendur af *in situ* mælingum með sjálfvirkum mælitækjum og söfnun sjávarsýna nærri losunarstaðunum á bryggjunni og nærri mörkum þess svæðis sem skilgreint er sem blöndunarsvæði, ásamt athugunum gerðum frá rannsóknarskipi bæði á siglingaleið og með mælingum með dýpi í firðinum. Yfirlit yfir þær mælistærðir sem mældar verða er gefið í töflu 5. Nákvæm mælingaráætlun er í vinnslu og verður send á leyfisveitendur fyrir rannsókn í júlí. Allar mælingar verða gerðar samkvæmt bestu vísindalegu aðferðum. Að auki er óskað eftir leiðsögn leyfisveitenda um þau skilyrði sem stjórnvöld setja fram.

Mælingar verða gerðar frá skipi sem hefur nægilegt pláss á dekki eða a.m.k. 7 m breitt og 20 m langt. Til viðbótar er krani eða A-rammi nauðsynlegur til að beita Sea-Bird CTD rosette til að safna vatnssýnum. Til viðbótar verða samfelldar mælingar gerðar á siglingaleið skipsins með

síritandi mælitækjum. Mælingar frá skipi á SF₆ verða gerðar með stuttu millibili til að skera úr um hvar sjórinn sem blandaðist NaOH er.

Náttúrulegur breytileiki líffræðilegu mælipáttanna verður ákvarðaður með daglegum mælingum og sýnasöfnun í tvær vikur áður en losunin mun eiga sér stað. Vöktun á karbónatkemíu mun vera stillt af þegar niðurstöður úr blöndunarlíkaninu fyrir losunarsvæðið liggja fyrir og þegar gagnagreining úr rannsókninni með tvöfalda sporefninu sem gerð var í júlí 2024 liggur fyrir. Lokaákvæðanir verða gerðar með því að nota þekkinguna sem fæst úr tilrauninni með flúrljómandi litarefni sem áætluð er í maí. Öryggisráðstafanir byggjast að stærstu leyti á pH mælingum sem vísi fyrir heilbrigði vistkerfisins (sjá nánar í kafla 6 um öryggisráðstafanir og viðbragðsáætlun).

Tafla 5: Yfirlit af mælingum sem fyrirhugað er að gera. Óskað er eftir leiðsögn leyfisveitenda um skilyrtar mælistærðir. Aðrar mælingar eru vegna vísindarannsókna.

○ mælingar <i>in-situ</i> með síritandi mælitækjum eða með síritandi mælitækjum á siglingaleið skips ◆ dýptarferlar með CTD tæki frá skipi ■ stök sýni		
Mælistærð	Innan og við jaðra blöndunarsvæðis	Úti í firði
Lýsa skilyrðum í viðtakanum og samanburður við hvernig módelið gerir ráð fyrir að hækkuð basavirkni dreifist		
Flæðihraði (<i>innan frárennslis</i>)	○	
Selta (<i>leiðni</i>)	○	○, ◆
Hiti	○	○, ◆
pH	○, ■	○
Heildar basavirkni	■	■
pCO ₂	○	○
Uppleyst ólífrænt kolefni	■	■
SF ₆		○

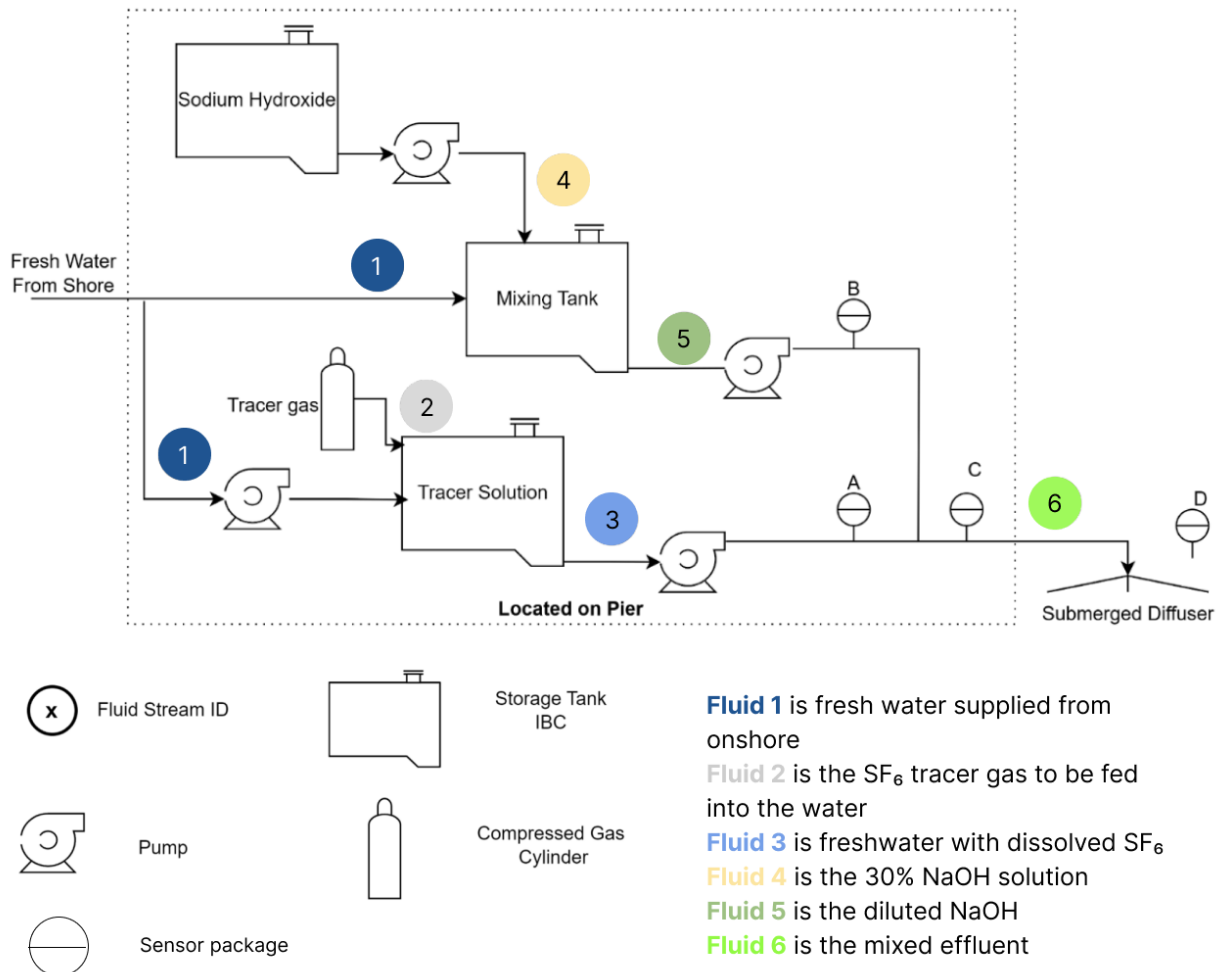


Gögn frá andrúmslofti	Utanaðkomandi, gert á landi	
Ástand vistkerfis		
Uppleyst súrefni	O	
Grugg	O	
Heildarefni í sviflausn	■	
Blaðgræna a	■	
Samsetning svifþörungasamfélaga (með FlowCytometry)	■	
Samsetning botndýrasamfélaga (með greiparsýni)	■	

5.3.5. Tæknileg atriði er varðar losun

Rannsóknateymið leggur til að losa að hámarki 30.000 L af 30% NaOH sem blandað verður 168.000 L af ferskvatni. Þessari lausn verður síðan blandað við ferskvatn blandað SF₆ og Rhodamín litarefni. Losunin verður gerð frá olíubryggju Olíudreifingar á Miðsandi í Hvalfirði. Lausnin verður losuð yfir u.þ.b. 48-96 klukkustunda tímabil og verður mögulegt að stilla flæðishraðann eins og þarf eða stöðva losun án tafar. Lausninni verður að öllum líkindum dreift með dreifikerfi með mörgum opnunum (e. diffuser) á 2 metra dýpi. Allur búnaður verður ATEX vottaður þar sem það á við.

Lausnirnar tvær verða í tönkum með viðeigandi öryggisbúnaði. Þeim verður síðan dælt með stýrðum flæðihraða til að blanda NaOH lausninni við lausnina sem er blönduð SF₆. Ferskvatn verður sótt í ferskvatnslögn fyrir brunakerfi sem er til staðar á bryggjunni. Dreifikerfið verður fest við bryggjuna og komið fyrir á föstu dýpi fyrir neðan yfirborðið. Flæðihraðinn er ákvaðaður fyrirfram með líkanútreikingum til að lágmarka pH og frávik í karbónatkemíu í vatninu sem tekur við lausninni. Á þessum tímapunkti er lagt til flæðihraðann á bilinu 30-60 L/mín en þetta gæti breyst með greiningum á því sem gerist á blöndunarsvæðinu og með gögnum í rauntíma frá tilrauninni. Flæði verður stýrt í samhengi við nærliggjandi strauma og sjávarföll sem verða vöktuð með straummæli og pH mæli svo að jafnt magn af efni sé losað á það flatarmáls vatns sem tekur við lausninni.



Mynd 8. Skematísk mynd af losunarbúnaðinum á bryggjunni. Lausnirnar tvær eru geymdar sitt í hvoru lagi og síðan blandað með dælu með stillanlegum hraða með stýribúnaði. Lausnirnar tvær og eiginleikar í blönduðu lausninni eru vaktðir með mælitækjum. Þessar upplýsingar fara inn í stjórnerfið sem skráir gögn bæði fyrir rauntímaviðbrögð og fyrir síðari greiningu. Blandaða lausnin mun dreifast út frá dreifistút sem verður undir sjávarborði í firðinum. Litarefninu verður blandað í aðra hvora lausnina.

5.4. Væntar niðurstöður úr rannsókn

Vísindaleg áhrif

Rannsóknin mun gefa marktækar vísindalegar niðurstöður fyrir stöðu þekkingar á CDR í sjó, sem kemur til viðbótar við svipaðar rannsóknir sem þegar eru í gangi í Kanada og

Bandaríkjunum. Yfirlit yfir vettvangsrannsóknir sem eru í gangi má finna í viðauka II. Þó að fleiri og fleiri niðurstöður úr rannsóknum sem gerðar eru með líkönum, í rannsóknastofum og í *mesocosm* séu til og gefi hugmyndir um möguleika og örugg mörk fyrir OAE, eru gögn úr raunverulegum aðstæðum nauðsynleg til að sannreyna þær forsendur og til að auka þekkingu á nýjum og nauðsynlegum rannsóknasviðum. Þessi gögn eru nauðsynleg fyrir rannsakendur og stjórnvöld til að hafa nauðsynlegar upplýsingar til að meta hvort að beiting OAE sé vænleg og ef svo reynist vera, undir hvaða skilyrðum það er.

Mikilvægt er að taka fram að þessi rannsókn mun gefa af sér kerfi sem sameinar athuganir og líkan sem grunn fyrir *Vöktun*, *Skrásetningu* og *Sannprófun* (e. Monitoring, Reporting, and Verification, MRV) á virkni OAE. Þessi brautryðjandi vinna mun gefa mikilvægt viðmið fyrir vísindafólk framtíðarinnar til að bæta sínar aðferðir svo hægt sé að draga úr óvissu, kostnaði og bæta gagnsæi í vöktun vegna CDR magntöku og umhverfislegum öryggismörkum.

Vonast er til að þessi rannsókn, sem framkvæmd er með gagnsæi að leiðarljósi, geri kleift að halda áfram rannsóknum á þessu sviði til framtíðar. Umfang og áherslur í slíkum framtíðarrannsóknum mun að stóru leyti vera háð niðurstöðunum og lærdómnum frá þessu rannsóknarverkefni og þeim framförum sem verða frá svipuðum verkefnum sem nú eiga sér stað víða um heim.

Aðgengi að gögnum og útgáfa

Öllum gögnum sem aflað er í rannsókninni verða gerð skil og aðgengileg í opnum gagnagrunni, með skýrslum og í ritrýndum tímaritum. Skýrslur og gögn verða auk þess send til innlendra eftirlitsaðila. Gögnum verður deilt undir *Creative Commons open licenses* CC0-1.0¹⁸ eða CC-BY 4.0¹⁹. Gögn verða send til *Ocean Carbon and Acidification Data System* (OCADS²⁰) hjá the National Centers for Environmental Information (NCEI) og *Ocean Carbon and Acidification Data System* (OCADS) hjá National Centers for Environmental Information (NCEI). Umhverfis DNA (eDNA) gögn verða send til *National Center for Biotechnology Information* (NCBI²¹). Gagnaskil munu uppfylla staðla um gögn og lýsigögn sem lýst er í *Guide to Best Practices in OAE Research*.²² Gagnaveiturnar veita opinn aðgang að gögnunum og fylgja meginreglum *Findable, Accessible, Interoperable, and Reusable (F.A.I.R.)*.

¹⁸ <https://creativecommons.org/publicdomain/zero/1.0/deed.en>

¹⁹ <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>

²⁰ <https://www.ncei.noaa.gov/products/ocean-carbon-acidification-data-system>

²¹ <https://submit.ncbi.nlm.nih.gov/>

²² <https://sp.copernicus.org/articles/2-oae2023/13/2023/>

6. Öryggisráðstafanir og viðbragðsáætlun

Við rannsóknina verða notuð efni sem flokkast sem hættuleg efni skv. efnalögum. Um þau gilda reglur um flutning, notkun, geymslu og förgun í samræmi við hættulega eiginleika þeirra. Við framkvæmd rannsóknarinnar verður gætt að því að efnin séu meðhöndluð í samræmi við lögin sem og leiðbeiningar framleiðenda efnanna. Starfsfólk fær þjálfun í meðferð efnanna og öryggisblöð og viðbragðsáætlun verða tiltæk. Öryggisblöð verða aðgengileg á íslensku og ensku.

Aðrar ráðstafanir og áhættuþættir sem tengjast rannsókninni gætu verið til dæmis óhagstæð veðurskilyrði eða bilun í tækjabúnaði. Áhætta sem tengist því sem gerist í sjónum, svo sem að pH fari yfir mörk, er þegar búið að taka tillit til við skipulagningu rannsóknarinnar og með þeim mælum sem gefa upplýsingar um pH gildi í rauntíma. Þannig er hægt að tryggja að pH fari ekki yfir mörk, einfaldlega með því að hægja á eða slökkva á dælingunni.

Hér að neðan er tafla sem tekur saman þá atburði sem gætu orðið til þess að stöðva þyrfti dælingu þar sem teknir eru saman mögulegir áhættuþættir og viðbragð við hugsanlegum atburðum og sem settir eru fram samkvæmt bestu vitund.

Tafla 6: Viðbragðsáætlun

Gerð	Atburður	Viðbragð	Aðgerð hefst á ný
Ýmislegt ekki tengt sjó	Slys á mannskap	Stöðva losun samstundis	
	Veikindi	Stöðva losun ef ekki er hægt að tryggja örugga losun	Nægilegur mannskapur til reiðu til að halda áfram
	Leki á sér stað	Stöðva losun samstundis	Leki hreinsaður upp/lekavandamál lagað og öruggar vinnuáðstæður nást á ný
	Óhagstæð veðurskilyrði, sem valda því að rannsóknarskipið getur ekki athafnað sig eða þannig að öryggi fólks á bryggjunni er í hættu (þ.e. ölduhæð eða sterkir vindar)	Stöðva losun samstundis	Þegar veðurskilyrði eru aftur góð og öryggi mannskaps og tækja er tryggt
Innan upphafs-	pH: hlaupandi	Stöðva losun	

Gerð	Atburður	Viðbragð	Aðgerð hefst á ný
blöndunarsvæðis	klukkustundar miðgildi >9	samstundis	
Jaðar blöndunarsvæðis	pH: ef eitthvert mæligildi er hærra en 9 eða >2 einingum yfir bakgrunnsgildum	Stöðva losun samstundis	Auka losun hægt og rólega, vakta nákvæmlega Senda skýrslu til eftirlitsaðila
Vistfræði	Yfirborðsfilma byggist upp í sjó eða við strönd	Stöðva losun samstundis	Auka losun hægt og rólega, vakta nákvæmlega
Tæknileg	Bilun í tækjabúnaði á bryggju svo sem stjórnlaus losun eða tap á losunargögnum	Stöðva losun samstundis	Búnaður er lagaður og öryggi prófað, öryggi starfsfólks er tryggt
	Söfnunarbúnaður er í ólagi svo sem SF ₆ mælingar á siglingaleið rannsóknaskips	Stöðva losun samstundis	Búnaður er lagaður
	Tap á CTD rosette	Stöðva losun samstundis	Búnaður er endurheimtur og komið í lag
	Ekki er hægt að rekja dreifinguna vegna bilunar í skipi	Stöðva losun samstundis	Rakning er möguleg eða handvirk rakning er tryggð sem byggir á sýnileika og því að starfsfólk er til taks
Skipulag	Samkeppni um notkun á olíubryggju eða umferð er í siglingaleið að bryggju	Stöðva losun samstundis	Engin samkeppni um notkun fyrirsjáanleg

7. Upplýsingar um landeigendur

Eigandi hafsvæða utan netlaga er íslenska ríkið.

Landeigandi lóðar og bryggju þar sem efni verða sett út í sjó er Olíudreifing ehf. Samstarfs- og viljayfirlýsing er fyrir hendi milli Rastar og Olíudreifingar. Rannsakendur hafa fulla heimild til að koma fyrir búnaði og athafna sig á svæðinu í samræmi við rannsóknaráætlun.

8. Samtal við stjórnvöld, hagaðila og samfélagið

Verkefnið hefur verið og verður áfram kynnt fyrir stjórnvöldum, stofnunum, íbúum og ýmsum hagaðilum. Hér að neðan er listi yfir þau sem hafa þegið kynningu á verkefninu hingað til, ásamt fyrirhuguðum kynningum.

Stjórnvöld, stjórnsýsla og stofnanir

- Utanríkisráðuneytið
- Umhverfis-, orku- og loftslagsráðuneytið
- Matvælaráðuneytið
- Umhverfisstofnun
- Hafrannsóknastofnun
- Skipulagsstofnun
- Veðurstofan
- Náttúrufræðistofnun Íslands
- Sveitarfélagið Hvalfjarðarsveit
- Sveitarfélagið Kjósarhreppur

Almenningur og hagaðilar

- Íbúafundur í júní 2024
- Hvammsvík sjóböð ehf.
- Náttúruverndarsamtök; Landvernd, Ungir umhverfissinnar, Náttúruverndarsamtök Íslands
- SFS - Samtök fyrirtækja í sjávarútvegi
- Veiðifélagin í Hvalfirði

Miðlun og opinberar kynningar

- Málstofa um aukningu á basavirkni sjávar (OAE) með Háskóla Íslands²³
- Frétt um 60 milljón króna styrkveitingu til Hafrannsóknastofnunar²⁴
- Frétt um 40 milljón króna styrkveitingu til Hafrannsóknastofnunar²⁵
- Fréttumfjöllun á vísir.is²⁶
- Fréttatími á Stöð 2²⁷

²³ https://www.hi.is/vidburdir/rannsoknir_a_aukinni_basavirkni_hafsins

²⁴ <https://vb.is/frettir/rost-styrkir-hafrannsoknastofnun-um-60-milljonir/>

²⁵ <https://fiskifrettir.vb.is/fjorutiu-milljonir-til-dypri-thekkingar-a-hvalfirdi/>

²⁶ <https://www.visir.is/g/20242601439d/rann-saka-mogu-leika-til-kolefnisforgunar-i-hval-firdi>

²⁷ <https://www.visir.is/k/4d06652a-0f3f-4455-97ce-20910e32ad6c-1722193180213/framtidin-konnud>

- Viðtal í Dagmálum á mbl.is²⁸
- Hádegisviðburður í Sjávarklassanum²⁹
- Myndband um Carbon to Sea, Röst sjávarrannsóknasetur, rannsóknir á aukinni basavirkni sjávar og fleira. Myndbandið var frumsýnt í desember 2024³⁰

Fyrirhugaðir fundir og kynningar árið 2025

- Heilbrigðiseftirlit Vesturlands
- Hvalur hf.
- Grundartangi
- veiðifélögin í Hvalfirði
- Íbúafundur; Kjósarhreppur, Hvalfjarðarsveit, Akraneskaupstaður
- Stjórn og starfsfólk Olíudreifingar
- Málstofa í maí 2025

Ráðgjafaráð Rastar sjávarrannsóknaseturs

Ráðgjafaráð Rastar er skipað öflugum fulltrúum með breiða þekkingu á málefnum hafsins. Hlutverk ráðgjafaráðsins er að veita leiðsögn og rýni á vísindalega aðferðafræði við uppbyggingu rannsóknanna og almennrar endurgjafar eins og á við. Þau svið sem eru mikilvæg eru einkum: áhrif á umhverfi og vistkerfi, MRV tækni og aðferðafræði, haffræði, hafefnafræði og félagsfræði.

Í ráðgjafaráði Rastar sitja:

- Dr. Angel Ruiz Angulo, hafeðlisfræðingur og dósent við Háskóli Íslands
- Dr. Halldór Pálmar Halldórsson, líffræðingur og forstöðumaður rannsóknaseturs Háskóla Íslands á Suðurnesjum
- Dr. Katja Fennel, haffræðingur og forstöðumaður haffræðideildar Dalhousie-háskóla í Kanada
- Dr. Matthew H. Long, lífjarðefnafræðingur við Woods Hole Oceanographic Institution í Bandaríkjunum
- Sólveig R. Ólafsdóttir, hafefnafræðingur og vísindamaður á Hafrannsóknastofnun

²⁸

https://www.mbl.is/mogginn/dagmal/innskraning/?redirect=/mogginn/dagmal/thjodmalin/255156/%3F_t%3D1734450262.6362474

²⁹ <https://sjavarklasinn.is/en/smart-oceans-lunch-a-dive-into-sustainability-and-innovation/>

³⁰

<https://www.youtube.com/watch?v=1x9hjCFDBN4&list=PLGVe6BxyFHNWdW4BARziQOWy1BzZphu6r&index=16>

Heimildir

Albright, R., Caldeira, L., Hosfelt, J., Kwiatkowski, L., Maclaren, J. K., Mason, B. M., Nebuchina, Y., Ninokawa, A., Pongratz, J., Ricke, K. L., Rivlin, T., Schneider, K., Sesboüé, M., Shamberger, K., Silverman, J., Wolfe, K., Zhu, K., and Caldeira, K.: Reversal of ocean acidification enhances net coral reef calcification, *Nature*, 531, 362–365, <https://doi.org/10.1038/nature17155>, **2016**.

Boettcher, M., Chai, F., Conathan, M., Cooley, S., Keller, D. P., Klinsky, S., Lezaun, J., Renforth, P., Scobie, M., and Webb, R. M.: A Code of Conduct for Marine Carbon Dioxide Removal Research, The Aspen Institute, Energy and Environment Program, 44, **2023**.

Clark, D. B., Lenain, L., Feddersen, F., Boss, E., and Guza, R. T.: Aerial Imaging of Fluorescent Dye in the Near Shore, <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-13-00230.1>, **2014**.

Ferderer, A., Chase, Z., Kennedy, F., Schulz, K.G. and Bach, L.T.: Assessing the influence of ocean alkalinity enhancement on a coastal phytoplankton community. *Biogeosciences*, 19(23), pp.5375-5399, **2022**.

Gately, J. A., Kim, S. M., Jin, B., Brzezinski, M. A., and Iglesias-Rodriguez, M. D.: Coccolithophores and diatoms resilient to ocean alkalinity enhancement: A glimpse of hope? *Science Advances*, 9(24), eadg6066. <https://doi.org/10.1126/SCIADV.ADG6066>, **2023**.

Gimenez, I., Waldbusser, G. G., and Hales, B.: Ocean acidification stress index for shellfish (OASIS): Linking Pacific oyster larval survival and exposure to variable carbonate chemistry regimes, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 6, 51, <https://doi.org/10.1525/elementa.306>, **2018**.

Hansen, B. W., Hansen, P. J., Nielsen, T. G., and Jepsen, P. M.: Effects of elevated pH on marine copepods in mass cultivation systems: practical implications, *Journal of Plankton Research*, 39, 984–993, <https://doi.org/10.1093/plankt/fbx032>, **2017**.

Ho, D.T., Schlosser, P., and Caplow, T.: Determination of Longitudinal Dispersion Coefficient and Net Advection in the Tidal Hudson River with a Large-Scale, High Resolution SF₆ Tracer Release Experiment. *Environmental Science & Technology* 2002 36 (15), 3234-3241. DOI: 10.1021/es015814+. **2002**.

Ho, D.T. & Schlosser, Peter & Houghton, R.W. & Caplow, Ted.: Comparison of SF₆ and Fluorescein as tracers for determining net advection and longitudinal dispersion in the tidal Hudson River. *Journal of Environmental Engineering*. 132. 1664-1669. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2006\)132:12\(1664\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2006)132:12(1664)). **2006**.

Ho, D. T., Engel, V. C., Variano, E. A., Schmieder P. J., and Condon, M. E.: Tracer studies of sheet flow in the Florida Everglades, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L09401, doi:10.1029/2009GL037355. **2009.**

Kheshgi, H. S.: Sequestering atmospheric carbon dioxide by increasing ocean alkalinity, *Energy*, 20, 915–922, [http://dx.doi.org/10.1016/0360-5442\(95\)00035-F](http://dx.doi.org/10.1016/0360-5442(95)00035-F), **1995.**

Kump, L. R., Brantley, S. L., and Arthur, M. A.: Chemical Weathering, Atmospheric CO₂, and Climate, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28, 611–667, <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.611>, **2000.**

Mallin, M. A. and Paerl, H. W.: Planktonic Trophic Transfer in an Estuary: Seasonal, Diel, and Community Structure Effects, *Ecology*, 75, 2168–2184, <https://doi.org/10.2307/1940875>, **1994.**

Pedersen, M. F. and Hansen, P. J.: Effects of high pH on a natural marine planktonic community, *Mar Ecol Prog Ser*, 260, 19–31, **2003a.**

Pedersen, M. F. and Hansen, P. J.: Effects of high pH on the growth and survival of six marine heterotrophic protists, *Mar Ecol Prog Ser*, 260, 33–41, **2003b.**

Subhas AV, Marx L, Reynolds S, Flohr A, Mawji EW, Brown PJ and Cael BB: Microbial ecosystem responses to alkalinity enhancement in the North Atlantic Subtropical Gyre. *Front. Clim.* 4:784997. doi: 10.3389/fclim.2022.784997, **2022.**

UN (United Nations Economic Commission for Europe): Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS) (Fourth ed.). **2011.**

Wassmann, P.: Retention versus export food chains: processes controlling sinking loss from marine pelagic systems, *Hydrobiologia*, 363, 29–57, <https://doi.org/10.1023/A:1003113403096>, **1997.**

Viðaukar

Viðauki I: Background on Ocean Alkalinity Enhancement

Sjá skjal: „01_Viðauki I_ Background on Ocean Alkalinity Enhancement.pdf“

Viðauki II: Importance of OAE Field Trials

Sjá skjal: „02_Viðauki II_ Importance of OAE Field Trials.pdf“

Viðauki III: OAE Site Location Information

Sjá skjal: „03_Viðauki III: MB-23.13_OAE_Site_Location_Information_2023-04-19.pdf“

Viðauki IV: Baseline Data Collection

Sjá skjal: „04_Viðauki IV_ Baseline Data Collection.pdf“

Viðauki V: Regional Ocean Model Development

Sjá skjal: „05_Viðauki V_ Regional Ocean Model Development.pdf“

Viðauki VI: Field Trial Report 2024

Sjá skjal: „06_Viðauki V_ Iceland Field Trial Report 2024.pdf“

Viðauki VII: Estimation of background variability of alkalinity in Hvalfjorður

Sjá skjal: „07_Viðauki VII_ Estimation of background variability of alkalinity in Hvalfjorður.pdf“

Viðauki VIII: Near-Field Mixing Model

Sjá skjal: „08_Viðauki VIII_ MB-24.25_Hermun_naersvaedis_v2.pdf“

Viðauki IX: NaOH toxicity study

Sjá skjal: „09_Viðauki IX_ NaOH toxicity study.pdf“

Viðauki X: Tracer release experiment in Regional Ocean Modeling System

Sjá skjal: „10_Viðauki X_ Tracer release experiment in Regional Ocean Modeling System.pdf“

Viðauki XI: Áhrifamat á vatnshlot 104-1330-C og 104-1236-C

Sjá skjal: „11_Viðauki XI_ Áhrifamat á vatnshlot.pdf“