

HV 2020-42
ISSN 2298-9137



HAF- OG VATNARANNSÓKNIR

MARINE AND FRESHWATER RESEARCH IN ICELAND

Umhverfisáhrif sjókvíaeldis - Mælingar á efnaferlum
í seti íslenskra fjarða

Rakel Guðmundsdóttir, Sólveig R. Ólafsdóttir, Hjalti Karlsson og Stefán Áki Ragnarsson

REYKJAVÍK ÁGÚST 2020

Umhverfisáhrif sjókvíaeldis - Mælingar á efnaferlum í seti íslenskra fjarða

Rakel Guðmundsdóttir, Sólveig R. Ólafsdóttir, Hjalti Karlsson og
Stefán Áki Ragnarsson

Skýrslan er unnin fyrir Hafrannsóknastofnun og Umhverfissjóð sjókvíaeldis

Upplýsingablað

Titill: Umhverfisáhrif sjókvíaeldis - Mælingar á efnaferlum í seti íslenskra fjarða		
Höfundur: Raket Guðmundsdóttir, Sólveig R. Ólafsdóttir, Hjalti Karlsson og Stefán Áki Ragnarsson		
Skýrsla nr. HV 2020-42	Verkefnisstjóri: Hjalti Karlsson	Verknúmer: 10840
ISSN 2298-9137	Fjöldi síðna: 34	Útgáfudagur: 28. ágúst 2020
Unnið fyrir: Hafrannsóknastofnun og Umhverfissjóð sjókvíaeldis	Dreifing: Opin	Yfirfarið af: Hrönn Egilsdóttir Bjarki Þór Elvarsson
Ágrip Hafrannsóknastofnun rannsakar og vaktar áhrif sjókvíaeldis á lífríki og efnafræði sets á svæðum utan vöktunarsvæða eldisfyrirtækja (fjarsvæði) ásamt því að safna grunngögnum um svæði þar sem eldi er ekki stundað enn sem komið er. Vöktunin og rannsóknirnar eru mikilvægur þáttur í að styrkja burðarþolsmat Hafrannsóknastofnunar. Hér er gerð grein fyrir niðurstöðum á efnaferlamælingum 237 kjarnasýna af botni Arnarfjarðar, Dýrafjarðar, Ísafjarðardjúps og Skutulsfjarðar ásamt erfðagreiningu baktería af svæði í Arnarfirði (Tjaldanes) sem hafði verið hvílt í rúmlega ár. Notast var við hárnákvæma mælitækni (O_2, afoxunarmætti (e. redox potential), pH og H_2S) með örnemum (microsensors) sem ekki hefur verið notuð áður við mælingar á seti frá strandsvæðum við Ísland. Vegna þess að þessi tækni hefur ekki verið notuð áður hér á landi fór fram samanburður á niðurstöðum mælinga frá Arnarfirði, Ísafjarðardjúpi og Skutulsfirði. Niðurstöðurnar sýndu að súrefnislagið (mm) í setinu frá sýnum í Ísafjarðardjúpi var þykkara að meðaltali en í Arnarfirði. Hærri styrkur brennisteinsvetnis (H_2S) mældist í efstu 1–2 cm sets í Arnarfirði miðað við Ísafjarðardjúp. Afoxunarmættið var öflugra í Arnarfirði á 2–5 cm dýpi sets miðað við Ísafjarðardjúpi. Magn lífræns efnis (%) var meira í seti Arnarfjarðar miðað við Ísafjarðardjúp. Ekki var marktækur munur á sýrustigi (pH) í seti milli Arnarfjarðar og Ísafjarðardjúps. Tengsl voru milli fjarlægðar eldiskvía við hraða (e. rate) súrefnisupptöku, heildar súrefnisupptöku, þykkt súrefnislags og afoxunarmætti á 2 cm dýpi sets í Arnarfirði. Efnafræðilegt ástand botnsets í Skutulsfirði var lakara en í hinum fjörðunum vegna langvarandi uppsöfnunar lífræns efnis frá byggð og iðnaði. Niðurstöður erfðarannsóknar baktería á sýnum frá Tjaldaneseyrum, hvíldu svæði sem bar merki lífrænnar mengunar (skv. myndbandsupptökum), leiddu í ljós að brennisteinskærar bakteríur voru ríkjandi þar. Eins og staðan er í dag er ekki hægt að fullyrða að fiskeldi hafi neikvæð áhrif á efnaferla sets fjarsvæða. Ekki voru tekin viðmiðunarsýni á fjarsvæðum í Arnarfirði áður en sjókvíaeldi hófst þar. Hinsvegar benda niðurstöður þessarar rannsóknar til þess að eftir því sem fjarlægð frá sjókvíaeldis eykst, minnka neikvæð áhrif á efnaferla sets.		

Abstract

The Marine and Freshwater Research Institute is studying and monitoring the effects of fish farming on the sediment in fjords. The aim is to understand these effects on sediment chemistry of areas that the fish farming companies are not obligated to monitor (far-field areas) and also to establish base-line knowledge about the sediments from areas that are not used as fish farming areas yet. The results will also be used for further development of the carrying capacity model that the Marine Research Institute developed for these fjords.

Here we present results for sediment chemistry analysis from Arnarfjörður, Ísafjarðardjúp, Dýrafjörður and Skutulsfjörður (237 core samples) and genetic analysis of bacteria from an area in Arnarfjörður (Tjaldanes) that had been fallowed for over a year. A very precise technique that is based on microsensors (O_2 , redox potential, pH and H_2S) was used to measure chemical properties of the sediment. Because this technique had never been used in Icelandic fjords, we compared the results of the different fjords. The results showed that the oxygen penetration depth (mm) was deeper in Ísafjarðardjúp compared with Arnarfjörður. Higher concentration of hydrogen sulphide (H_2S) was measured at 1 and 2 cm depth in Arnarfjörður compared with Ísafjarðardjúp. Redox potential was significantly higher at 2 – 5 cm depth in Arnarfjörður compared with Ísafjarðardjúp. No significant difference was between Arnarfjörður and Ísafjarðardjúp regarding the pH value from the sediments. Organic content (%) was significantly higher in Arnarfjörður compared with Ísafjarðardjúp. Higher oxygen uptake rate and shorter oxygen penetration depth were correlated with estimates of organic impacts from the salmon farm sites. The sediment condition in samples from Skutulsfjörður was poorer compared with the other fjords due to long term organic enrichment from the town Ísafjörður.

Samples from Tjaldanes, an area that had signs of organic loading (according to video recording) were analysed and the results showed the presence of various genera of sulphur bacteria. The relative abundance of bacteria DNA in the samples was dominant by various sulphur bacteria.

It is not possible to say with certainty if there are impacts from fish farms on far-field sediments, but continuous monitoring will clarify that.

Lykilorð: *Fiskeldi, fjarsvæði, lífrænt álag, set, súrefni, brennisteinsvetni, pH, afoxunarmætti, örnemar*

Undirskrift verkefnisstjóra:



Undirskrift forstöðumanns sviðs:



Efnisyfirlit	Bls.
Töflur.....	ii
Myndir	ii
Inngangur	1
Rannsóknasvæði	5
Arnarfjörður	5
Dýrafjörður	7
Ísafjarðardjúp.....	8
Skutulsfjörður	10
Aðferðir	11
Sýnataka.....	11
Geymsla sýna	12
Mælingar á lífrænu efni (LOI).....	12
Mælingar með örnemum (microsensors)	13
Tækjabúnaður	13
Súrefnismælingar (O ₂).....	14
Afoxunarmættismælingar (redox potential - Eh).....	15
Sýrustig (pH).....	15
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	15
DNA greining á bakteríum í seti	15
Greining gagna og framsetning	16
Niðurstöður.....	17
Magn lífræns efnis (%)	18
Meðalþykkt súrefnislags (mm).....	18
Súrefnisupptaka í vatnsfasa (integrated production/consumption).....	18
Styrkur súrefnis í vatnsfasa	19
Súrefnisnotkunarhraði sets (rate)	19
Afoxunarmætti (redox potential).....	19
Sýrustig (pH).....	20
Brennisteinsvetni (H ₂ S)	20
Erfðagreining sýna frá Tjaldanesi	21
.....	22
Umræður	23
Ályktanir.....	27
Þakkarorð.....	28
Heimildir	29
Viðaukar	31
.....	33
Nokkur hugtök	34

Töflur

Tafla 1. Yfirlit á stöðu eldissvæða Arnarlax í Arnarfirði frá júlí 2017-júní 2020.

Tafla 2. Fjöldi sýna (kjarnar og lífrænt efni) í leiðöngurum Hafrannsóknastofnunar 2018 – 2019 í Arnarfirði, Ísafjarðardjúpi, Dýrafirði og Skutulsfirði.

Tafla 3. Mat á lífrænu álagi m.t.t. staðsetninga sýnatökustöðva og kvía í Arnarfirði á þeim tíma sem sýnin voru tekin.

Tafla 4. Lýsandi tölfræði (meðaltöl og staðalfrávik) ýmissa umhverfismælinga í seti frá Arnarfirði, Ísafjarðardjúpi (án Skutulsfjarðar), Skutulsfirði og Dýrafirði.

Myndir

1. mynd. Rafeindaþegar (oxarar) sýndir í þeirri röð sem þeir eru nýttir í náttúrunni við niðurbrot.
2. mynd. Helsti munur sem búast mætti við í efsta lagi sjávarsets á milli ómengaðra og mengaðra svæða.
3. mynd. Vestfjarðarkjálkinn þar sem aðgreindir eru Arnarfjörður, Dýrafjörður, Ísafjarðardjúp og Skutulsfjörður.
4. mynd. Skilgreind eldissvæði (gulir, bláir og grænn reitur) í Arnarfirði.
5. mynd. Skilgreind eldissvæði (bláir reitir) í Dýrafirði.
6. mynd. Skilgreind eldissvæði sem hafa verið samþykkt eða sótt hefur verið um í Ísafjarðardjúpi.
7. mynd. Skilgreind eldissvæði Hábrúnar í Skutulsfirði.
8. mynd. Rör með setsýnum (kjarnar) og loftunarbúnaður.
9. mynd. Örnemar fyrir súrefni og pH mælingar, ásamt viðmiðunarnema.
10. mynd. Súrefnisprófíll úr kjarna frá Óshlíð í Ísafjarðardjúpi.
11. mynd. Súrefnisprófíll úr kjarna frá kvíasvæði í Skutulsfirði
12. mynd. Arnarfjörður með nákvæmri staðsetningu (sjá hnit á mynd) erfðasýna á Tjaldanesi.
13. mynd. Skjáskot af myndbandsupptökum frá Skutulsfirði (A og B) og Arnarfirði (C og D).
14. mynd. Hlutfallslegt magn (%) bakteríu DNA algengustu hópa sem greindust í sýnum (sjór við botn) frá Tjaldanesi.

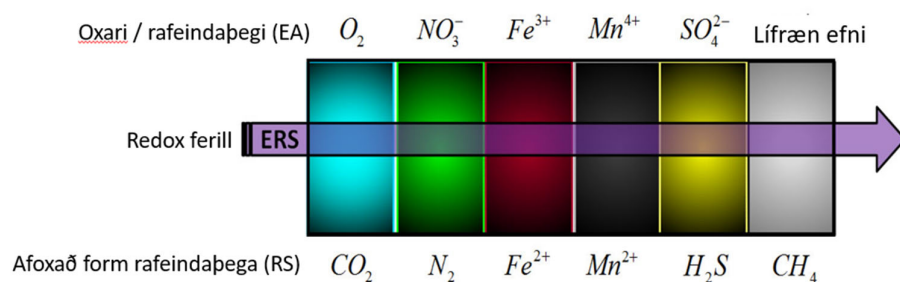
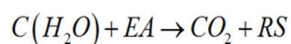
Inngangur

Eldi á laxi (*Salmo salar*) í sjókvíum er vaxandi iðnaður á Íslandi og náði framleiðslan árið 2019 rétt yfir 25.000 tonn og er það rúmlega tvöföldun frá árinu 2018. Þar af voru rúmlega 16.000 tonn framleidd á Vestfjörðum, þar með talið í Arnarfirði og Dýrafirði (Ársskýrsla dýralæknis fisksjúkdóma 2019). Eldissvæði einskorðast nú við Vestfirði og Austfirði.

Umhverfisáhrif laxeldis í sjókvíum geta verið margvísleg. Ber þar að nefna hættu á erfðablöndun eldislaxa og villtra laxa vegna slysasleppinga, laxa- og fiskilúsarvandamál á eldislaxi og villtum laxfiskum, aukaverkanir lyfja (böðun og fódurrun) og mengun vegna úrgangs og fódurleifa. Öll þessi áhrif eru talin geta verið verulega neikvæð fyrir umhverfið en mörg þeirra eru afturkræf þegar eldi er hætt eða svæði eru hvíld á milli eldislota (Keeley *et al.* 2014).

Frá fiskeldi losna lífræn og ólífræn efnasambönd í formi úrgangs, fódurleifa og afurða öndunar eldisfisks (CO_2). Þessi efnasambönd innihalda kolefni (C), köfnunarefni (N) og fosfór (P) í ýmsum formum (Carroll *et al.* 2003, Wang *et al.* 2012, Bannister *et al.* 2014). Talið er að um helmingur úrgangsins falli til botns neðan við og nálægt kvíum sem þungar lífrænar agnir (POP, PON og POC). Hinn helmingur úrgangsins dreifist um í sjónum sem léttar/uppleystar lífrænar agnir (DOP, DON og DOC) og í uppleystu ólífrænu formi (t.d. NH_3^+ , PO_4^{3-} og CO_2) (Sanz-Lázaro & Marín 2008, Wang *et al.* 2012, Sólveig R. Ólafsdóttir *et al.* 2017 a). Helstu þættir sem hafa áhrif á hversu mikil losun á sér stað frá fiskeldi eru framleiðslumagn eldisins og fódurstuðull (fóðurnotkun á móti framleiðslu). Þættir sem hafa áhrif á dreifingu og niðurbrot efnasambandanna eru t.d. dýpi á eldissvæði, hafstraumar, blöndun sjávar, botngerð (harka undirlags og formgerð botns), lagskipting vatnsbols og hitastig (Holmer *et al.* 2005, Sólveig R. Ólafsdóttir *et al.* 2017 a).

Lífrænt efni + rafeindaþegi $\rightarrow$ koltvísýringur og afoxað form rafeindaþega



1 mynd. Rafeindaþegar (oxarar) sýndir í þeirri röð sem þeir eru nýttir í náttúrunni við niðurbrot. Afoxuð form rafeindaþegana eru einnig sýnd ásamt almennri formúlu fyrir niðurbrot lífræns efnis í náttúrunni (breytt mynd frá: Urban *et al.* 2008).

Uppleystu ólífrænu efnasamböndin geta nýst strax til vaxtar og viðgangs svifþörunga, séu aðstæður til þess hentugar. Lífrænu efnasamböndin þarf hins vegar að brjóta niður og þar eru ýmsar niðurbrotslífverur (t.d. þráðormar og burstormar) og bakteríur í lykilhlutverki (Bannister *et al.* 2014).

Lífræn efni eru skilgreind sem afoxarar (reducing agents) en til þess að brjóta afoxara niður þarf efnasambönd og efni sem eru oxarar (oxydation agents) ásamt loftháðum eða loftfirrðum bakteríum. Mikið magn af lífrænum efnum getur leitt til súrefnisskorts vegna þess að súrefni (O_2) er sá oxari sem er öflugastur og fyrst er gengið á við niðurbrot. Þegar súrefni þrýtur verða loftfirrðar bakteríur ríkjandi en þær nýta sér aðra oxara til niðurbrots, t.d. NO_3^- , Mn^{4+} , Fe^{3+} og SO_4^{2-} . Sjá má feril/röðun oxara á 1. mynd (Jørgensen 1982, Strain og Hargrave 2005, Glud 2008). Sumar þessar loftfirrðu bakteríur framleiða eitruð efnasambönd eins brennisteinsvetni (H_2S) þegar þær oxa súlfat (SO_4^{2-}). Aðrar bakteríur eins og t.d. *Beggiatoa* spp. oxa brennisteinvetni og skilja út hreinan brennistein ef súrefni er til staðar í litlu magni ($2H_2S + O_2 \rightarrow 2S + 2H_2O$) (Jørgensen *et al.* 2010). Hvítar slíkjur eða „mottur“ á botni eru einkennandi fyrir tilvist *Beggiatoa* baktería. Finnist þessar hvítu slíkjur á botni er það talið geta verið merki um mikið lífrænt álag. Brennisteinsefnasambönd eru eitruð og geta haft mjög neikvæð áhrif á lífverur í seti, og jafnvel á eldisfisk séu þau í miklu magni (Bannister *et al.* 2014).

Mikil lífræn mengun getur leitt til minnkunar í líffræðilegum fjölbreytileika og valdið breytingum á tegundasamsetningu með þeim hætti að tækifærissinnaðar tegundir verða mjög algengar (Sanz-Lázaro og Marín 2008, Bannister *et al.* 2014). Ein af þessum tegundum er burstormurinn *Capitella capitata* sem á auðvelt með að laga sig að breyttum aðstæðum, sérstaklegar þar rask hefur orðið á sjávarbotni eða ofauðgun. Sumar lífverur teljast tækifærissinnar vegna þess að þær eiga auðveldar uppdráttar við erfiðar aðstæður líkt og súrefnisskort (Mazzola *et al.* 2000). *Capitella capitata* er ekki mikið þolnari en aðrar botndýrategundir gagnvart súrefnisskorti en kynslóðartími tegundarinnar er stuttur og hæfileikinn til að dreifa sér hratt og víða gefur tegundinni forskot gagnvart öðrum tegundum. Því er hún flokkuð sem tækifærissinni (r – tegund) (Tsutsumi, 1987). Tegundir sem eru tækisfærissinnar eru mikilvægar fyrir framvindu fínu á menguðum svæðum en eftir því sem hvíldartíminn lengist skiptast þessar tegundir út fyrir aðrar tegundir og fjölbreytni fánunnar á botninum eykst á ný.

Náttúrulegir umhverfisþættir hafa einnig áhrif á súrefnisbúskap og efnaferla sjávarsets. Almennt er meiri ákoma lífrænna efna á standsvæðum, miðað við svæði á meira dýpi. Þetta gerir það að verkum að súrefnislag (efsta lag sets þar sem telja má súrefnisríkt) nær alla jafna stutt niður í set strandsvæða (oftast fáir millimetrar) (Glud 2008, Zaborska *et al.* 2018).

Uppruni lífræna efnisins skiptir einnig máli, en þekkt er að lífrænt efni sem upprunið er frá frumframleiðslu í sjó er auðveldara í niðurbroti en lífrænt efni sem upprunið er af landi (Zaborska *et al.* 2018). Aðrir þættir eins og t.d. þröskuldar í fjörðum og árstíðarbundin lagskipting (sbr. Arnarfjörður) geta einnig haft mikil áhrif á súrefnisbúskap sjávar (Sólveig R. Ólafsdóttir *et al.* 2017 a) og þar með hugsanlega einnig á set og niðurbrot. Mikilvægt er að rannsaka firði og strandsvæði sem nota skal fyrir fiskeldi til þess að meta náttúrulegan breytileika og bera hann síðar saman við breytileika sem mögulega kemur til vegna fiskeldis.

Ýmsar mælingar hafa verið framkvæmdar til þess að meta áhrif fiskeldis á umhverfið m.t.t. lífrænnar mengunar. Þetta hafa aðallega verið aðferðir við mat á þéttleika og tegundasamsetningu botndýra, ásamt aðferðum sem ganga út á að mæla efnabreytur í seti. Sú aðferð að telja og greina botndýr er mjög góð og næm en hún krefst mikils tíma og sérfræðikunnáttu. Stundum eru einfaldar punkt efnamælingar (t.d. O₂, afoxunarmætti, pH og H₂S punktmæling á efstu 2 – 3 cm sets) notaðar til að meta ástand sets undir kvíum og þá jafnvel til hliðsjónar við gróf flokkun á botndýrum (t.d. ISO 12878 staðallinn).

Flestar rannsóknir m.t.t. lífrænnar mengunar frá laxeldi í sjókvíum hafa verið einskorðaðar við sjálft áhrifasvæði eldisins (0 – 100 m frá kvíum) og bera fiskeldisfyrirtækin ábyrgð á vöktun þessara svæða. Fáar rannsóknir hafa hins vegar verið framkvæmdar á áhrifum á fjarsvæði (t.d. heila firði) og því er skortur á vitneskju þar (Sará *et al.* 2011).

Hafrannsóknastofnun hefur metið burðarþol m.t.t. fiskeldis fyrir nokkra íslenska firði og meðal þessara fjarða voru Arnarfjörður og Ísafjarðardjúp sem eru aðal viðfangsefni þessa verkefnis. Samkvæmt lögum um fiskeldi frá árinu 2014 skal burðarþol Hafrannsóknastofnunar liggja að baki rekstrarleyfis fiskeldisfyrirtækja. Burðarþolsmatið byggir á líkani sem metur þol svæða til þess að taka á móti auknu lífrænu álagi án þess að það hafi óásættanleg áhrif á lífríkið. Inn í líkanið eru teknar mælingar á straumum, vatnsskiptum, súrefni við botn og fleira. Samkvæmt matinu er Arnarfjörður talinn geta borið 20.000 tonn, Dýrafjörður 10.000 tonn og Ísafjarðardjúp 30.000 tonn (Sólveig R. Ólafsdóttir *et al.* 2017a). Í dag er burðarþol Arnarfjarðar og Dýrafjarðar ekki fullnýtt en stefnt er á fulla nýtingu á næstunni. Ekkert laxeldi hefur verið sett af stað í Ísafjarðardjúpi vegna áhættumats erfðablöndunar sem Hafrannsóknastofnun gaf út árið 2018. Á undangengnum 20 árum hefur eldi þorsks (bæði áframeldi og aleldi) og síðar regnbogsilungs (*Oncorhynchus mykiss*), verið stundað í þremur fjörðum Ísafjarðardjúps, Skutulsfirði, Álftafirði og Seyðisfirði. Nú er svo komið að aðeins er alinn regnbogasilungur í Skutulsfirði. Nýlega gaf Hafrannsóknastofnun út nýja ráðgjöf um eldi á frjóum laxi í sjókvíum en þar er gert ráð fyrir að leyfilegt verði að ala 12.000 tonn af frjóum eldislaxi í Ísafjarðardjúpi, utan Æðeyjar (Ráðgjöf vegna áhættu erfðablöndunar Hafrannsóknastofnunar 2020).

Ómenguð svæði

↑ súrefnisstyrkur við yfirborð sets

Súrefni nær djúpt niður í set miðað við í menguðum svæðum

↓ súrefnisnotkun í seti

Súrefnisnotkun gæti verið mest í efsta hluta sets á vorin, en annars væri hún mest neðar í setinu

↑ afoxunarmætti (upp í u.þ.b. +600 mV)

Redox lag (þar sem afoxunarmætti fer úr + í – tölu) er neðarlega í setinu

↓ eða enginn styrkur H_2S

Hlutlaust pH

Menguð svæði

↓ súrefnisstyrkur við yfirborð sets

Súrefni nær grynna niður í set miðað við í ómenguðum svæðum

↑ súrefnisnotkun í seti

Súrefnisnotkun er gjarnan mest efst í setinu öllum stundum

↓ afoxunarmætti (niður í u.þ.b. – 300 mV)

Redox lag (þar sem afoxunarmætti fer úr + í – tölu) er ofarlega í setinu

↑ H_2S

↓ pH en í ómenguðum svæðum

2. mynd. Helsti munur sem búast mætti við í efsta lagi sjávarsets á milli ómengaðra og mengaðra svæða sé litið til þeirra efnafræðilegra breyta (O_2 , afoxunarmættis/redox, H_2S og pH) sem metnar voru í þessari rannsókn.

Markmið þessa verkefnis er að meta ástand botnsets með efnamælingum (ýmsar O_2 breytur, pH, afoxunarmætti/redox og brennisteinsvetni/ H_2S) og möguleg áhrif lífrænnar mengunar frá eldi. Sjá má á 2. mynd gróflega helsta mun sem búast má við í efsta lagi sjávarsets á milli svæða sem eru undir litlu eða miklu lífrænu álagi.

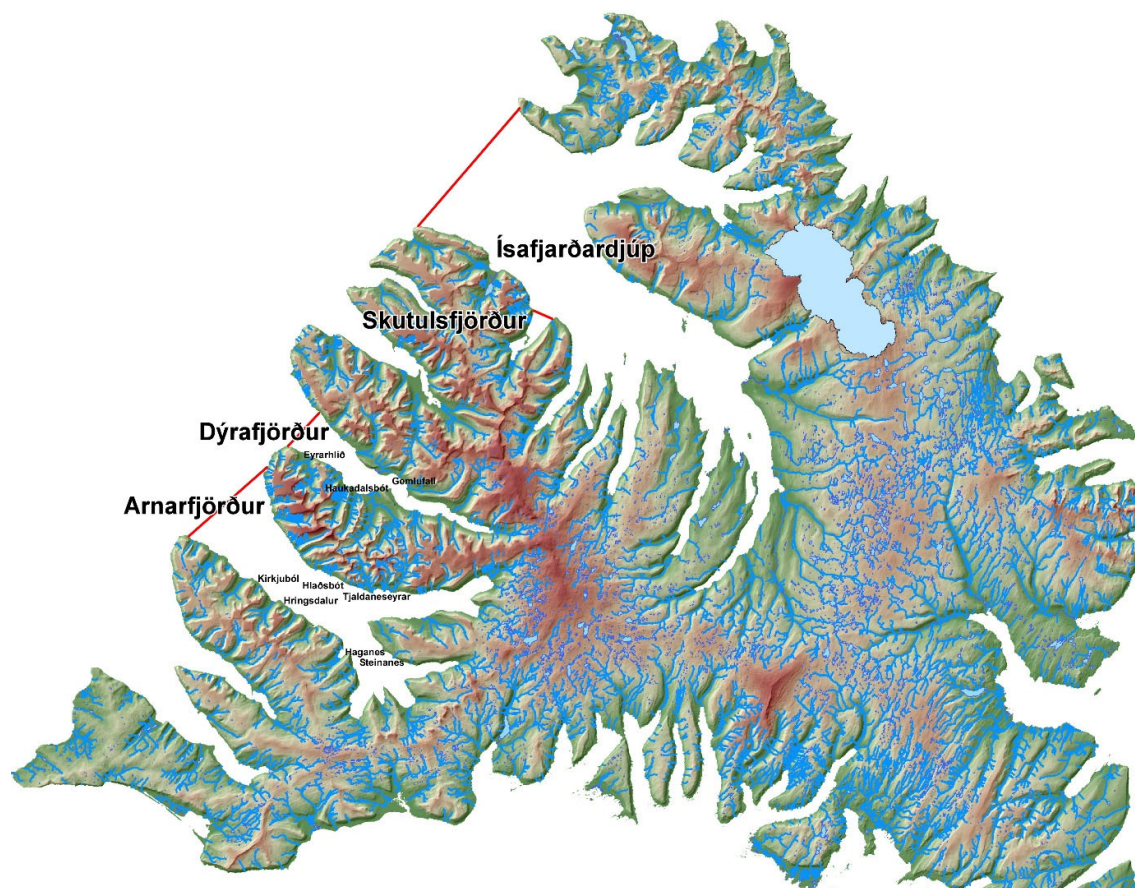
Áherslan í þessum hluta verkefnisins og þessarar skýrslu er:

1. Safna grunngögnum á svæðum í Ísafjarðardjúpi þar sem fiskeldi hefur ekki verið stundað, en koma til greina sem eldissvæði.
2. Vakta botnset Arnarfjarðar og gefa frummat á áhrifum fiskeldisins á botn m.t.t. fjarlægðar frá eldiskvíum.

Í skýrslunni eru mælingar frá Arnarfirði og Ísafjarðardjúpi bornar saman m.t.t. efnaferla botnsets. Þetta er eina leiðin til þess að fá samanburð í mælingum í efnaferlum þar sem álíka aðferðir hafa ekki verið notaðar áður á sjávarset við Ísland. Það er þó ekki hægt að draga afgerandi ályktanir út frá þessum samanburði vegna þess að munur er á ýmsum breytum (t.d. munur á efnafræði vatnsbols) milli fjarðanna (sjá: Sólveig R. Ólafsdóttir *et al*, 2017 a og b). Síðar mun gefast möguleiki á að bera firðina betur saman innbyrðis en hér er gert.

Öðrum rannsóknum innan sama verkefnis, sem ekki verður gerð skil hér ganga út á að meta botndýr í og á seti (tegundasamsetningu og þéttleika), efnamælingar frá vatnsbol (ýmiss næringarefni og O_2) ásamt eðlis og efnafræðilegum þáttum á sömu svæðum. Höfuðtilgangur allra þessara rannsókna er að bæta áreiðanleika burðarþolsmatsins með því að tengja rannsóknarniðurstöður þess og líkön burðarþolsins saman. Á þann hátt er hægt að þróa burðarþolsmatið svo það líki enn betur eftir raunverulegum aðstæðum í hverjum firði fyrir sig.

Rannsóknasvæði



3. mynd. Vestfjarðarkjálkinn þar sem aðgreindir eru Arnarfjörður, Dýrafjörður, Ísafjarðardjúp og Skutulsfjörður. Rauð lína táknar ytri mörk þessara fjarða. Helstu eldissvæði eru tilgreind fyrir Arnarfjörð og Dýrafjörð.

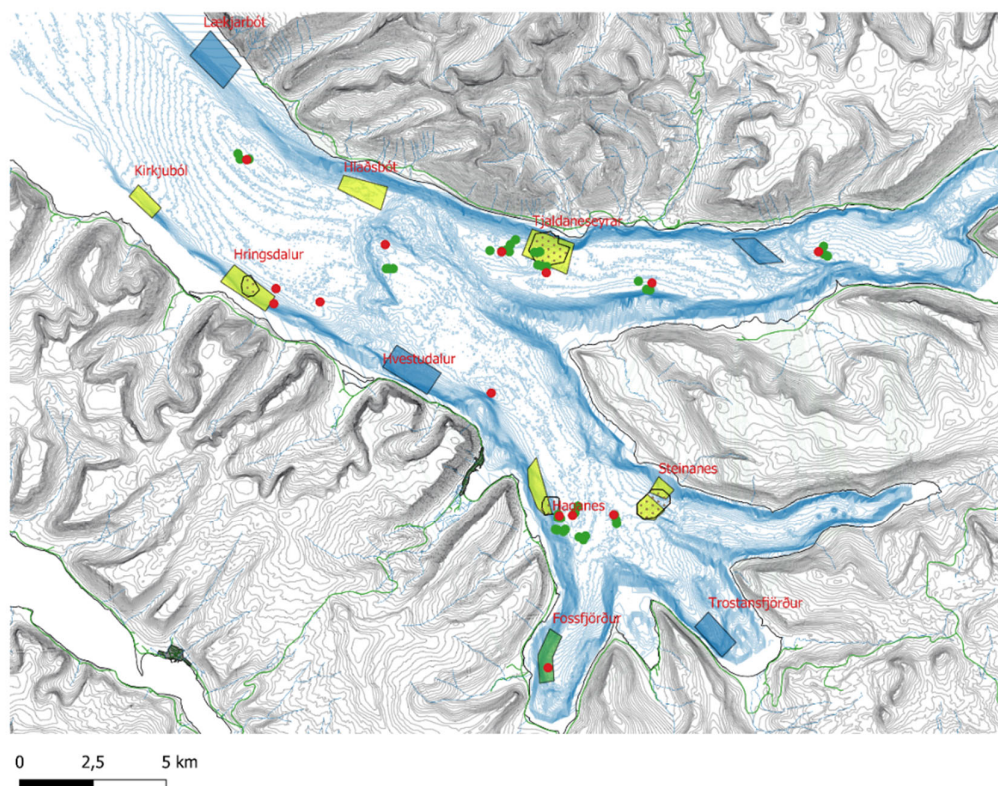
Arnarfjörður

Arnarfjörður (3 og 4 mynd) er einn af syðri fjörðum Vestfjarða og er um 9 km á breidd þar sem hann er breiðastur við mynnið og er hann 285 km² að flatarmáli. Fjörðurinn er um 40 km langur frá mynni til innstu fjarða. Dýpi Arnarfjarðar er að meðaltali 70 – 100 m en mesta dýpi er 110 m. Innfirðir eru sjö talsins og í firðinum eru þröskuldar sem hafa talsverð áhrif á vatnsskiptin. Þessir þröskuldar eru á bilinu 20 – 50 metra frá botninum. Síðla sumars þegar lagskipting er áberandi fellur náttúrulegur styrkur uppleysts súrefnis (O₂) niður í allt að 3,0 mL L⁻¹ vegna takmarkaðra vatnsskipta í firðinum og niðurbrots. Uppblöndun sjávar í firðinum á sér stað í nóvember eða desember (Sólveig R. Ólafsdóttir *et al.* 2017 a).

Arnarfjörður er talinn geta borið 20.000 tonna lífmassa skv. burðarþolsmatinu án þess að það hafi verulega neikvæð áhrif á súrefnisbúskap fjarðarins. Talið er að með fullri nýtingu

burðarpols fjarðarins muni styrkur súrefnis við botn fara allt niður í u.þ.b. 2 mL L⁻¹ (Sólveig R. Ólafsdóttir *et al.* 2017 a).

Burðarpolsmat Arnarfjarðar er 20.000 tonna ársframleiðsla og er laxeldisfyrirtækið Arnarlax starfandi þar en einnig fyrirhugar Arctic Sea Farm að hefja starfssemi þar í nánustu framtíð.



4. mynd. Skilgreind eldissvæði (gulir, bláir og grænn reitur) í Arnarfirði. Gulir reitir tákna eldissvæði Arnarlax hf. en bláir reitir eru svæði sem Arctic Sea Farm hf. hefur sótt um leyfi fyrir en eru ekki í notkun. Kirkjuból og Hlaðsbót sem tilheyra Arnarlax hf. hafa ekki verið notuð fyrir eldi en fyrirhugað er að setja út seiði þar fljótlega. Svartir útjaðrar innan skilgreindra eldissvæða og punktar innan þeirra tákna staðsetningu akkera Arnarlax hf. í október 2019. Grænn reitur tákna hvílt svæði Arnarlax hf. í Fossfirði. Grænir punktar tákna kjarnastöðvar sem teknar voru 2018 en rauðir punktar tákna kjarnastöðvar frá 2019. Fyrir hvern rauðan punkt eru þrjú kjarnasýni en eitt kjarnasýni er fyrir hvern grænan punkt. Svæðið Tjaldanes hafði verið í hvíld í meira en ár þegar sýni voru tekin þar í október 2018.

Eldissvæði sem Arnarlax (áður Fjarðarlax) hefur haft í notkun undanfarin eru: Hringsdalur, Tjaldanes og Haganes, Steinanes og Fossfjörður (3 og 4 mynd). Á hverju þessara svæða má framleiða 5.000 tonn af laxi á ári en heildarframleiðsluleyfi fyrirtækisins er nú 10.000 tonn árlega í firðinum. Framleiðsla Arnarlax í Arnarfirði var um 7.000 tonn á síðasta ári og hefur fyrirtækið ekki full nýtt leyfi sín til þessa í firðinum (Matvælastofnun, 2020).

Staða eldissvæða í enda mars 2020 var sú að Haganes hafði verið í hvíld frá lok mars 2019, Steinanes hafði verið í hvíld frá því í lok nóvember 2019 en eldi var í gangi í Hringsdal og á Tjaldanesi. Haganes hafði því verið hvílt í um sjö mánuði áður en sýnataka fór fram í október 2019. Á þeim tíma var fiskur í tveimur kvíum á Steinanesi en slátrun lauk þar stuttu eftir

sýnatökuna. Eldissvæðið á Tjaldanesi hafði verið hvílt í rúmlega eitt ár þegar sýnatakan fór fram árið 2018 en hafði verið virkt í fjóra mánuði áður en sýnatakan fór fram 2019 (munnleg heimild: Þorsteinn Másson 27.03.2020). Tafla 1 sýnir gróflega stöðu eldissvæða Arnarlax í Arnarfirði frá júlí 2017 til júní 2020.

Tafla 1. Yfirlit á stöðu eldissvæða Arnarlax í Arnarfirði frá júlí 2017- júní 2020 (heimildir frá Arnarlax hf).

	2017		2018				2019				2020	
Tímabil*	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2
Haganes	Fiskur							Hvöld				
Hringsdalur	Fiskur			Hvöld	Fiskur							Hvöld
Steinanes	Fiskur										Hvöld	
Tjaldanes	Hvöld								Fiskur			

*Tímabil töflu:

1 = janúar, febrúar og mars.

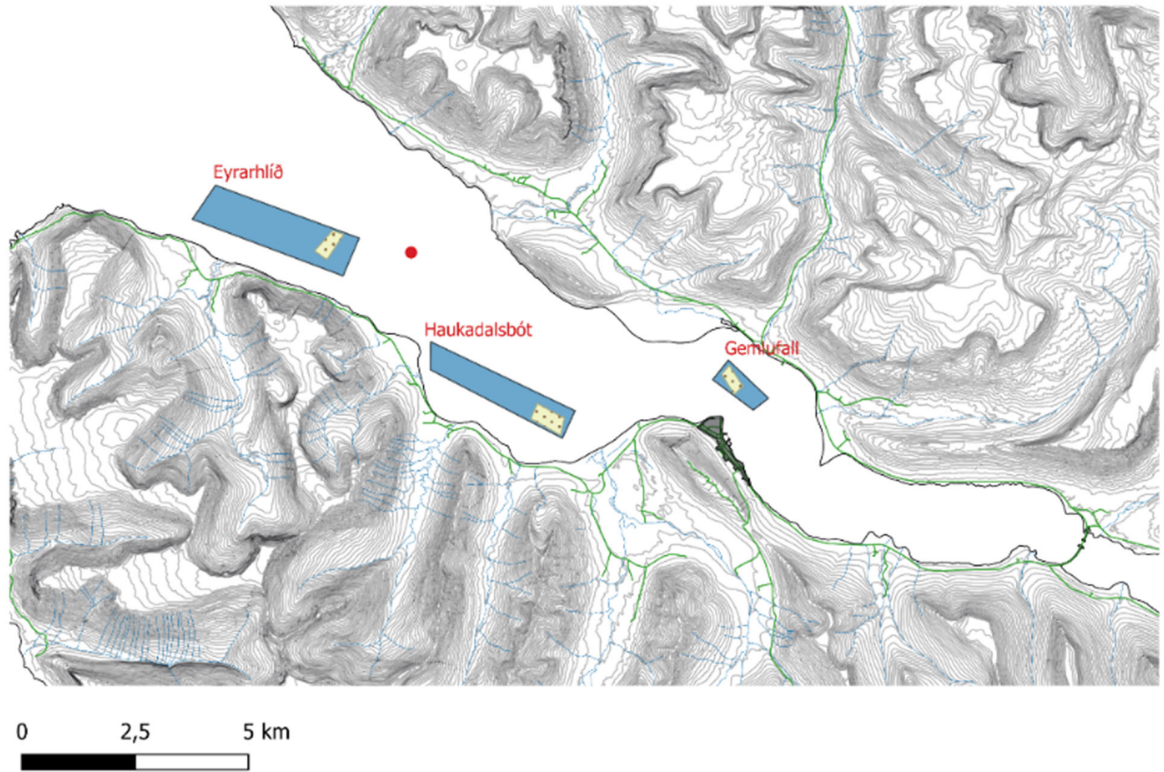
2 = apríl, maí og júní.

3 = júlí, ágúst og september.

4 = október, nóvember og desember.

Dýrafjörður

Dýrafjörður er líkt og Arnarfjörður einn af syðri fjörðum Vestfjarða. Fjörðurinn er 9 km á breidd þar sem hann er breiðastur við mynnið og er hann 77 km² að flatarmáli. Lengd frá mynni til innsta hluta er um 30 km. Dýpi Dýrafjarðar er að meðaltali 40 m og er hann dýpstur við mynni um 55 m en grynstur innst eða um 20 m. Engir innfirðir eru í Dýrafirði en fjörðurinn er frekar þröngur en vel uppblandaður allt árið þar sem engir áberandi þröskuldar eru í honum. Samkvæmt burðarþolsmati Hafrannsóknastofnunar er Dýrafjörður talinn geta borið 10.000 tonna lífmassa. Þar eru nú framleidd um 4.000 tonn af laxi árlega af Arctic Sea Farm. Eldissvæðin eru Gemlufall, Haukadalsbót og Eyrarhlíð (Sólveig R. Ólafsdóttir *et al.* 2017 a) (5. mynd). Fyrirtækið hefur einnig sótt um leyfi fyrir frekari framleiðslu með stækkun svæða í huga ásamt nýju eldissvæði við Skagahlíð.



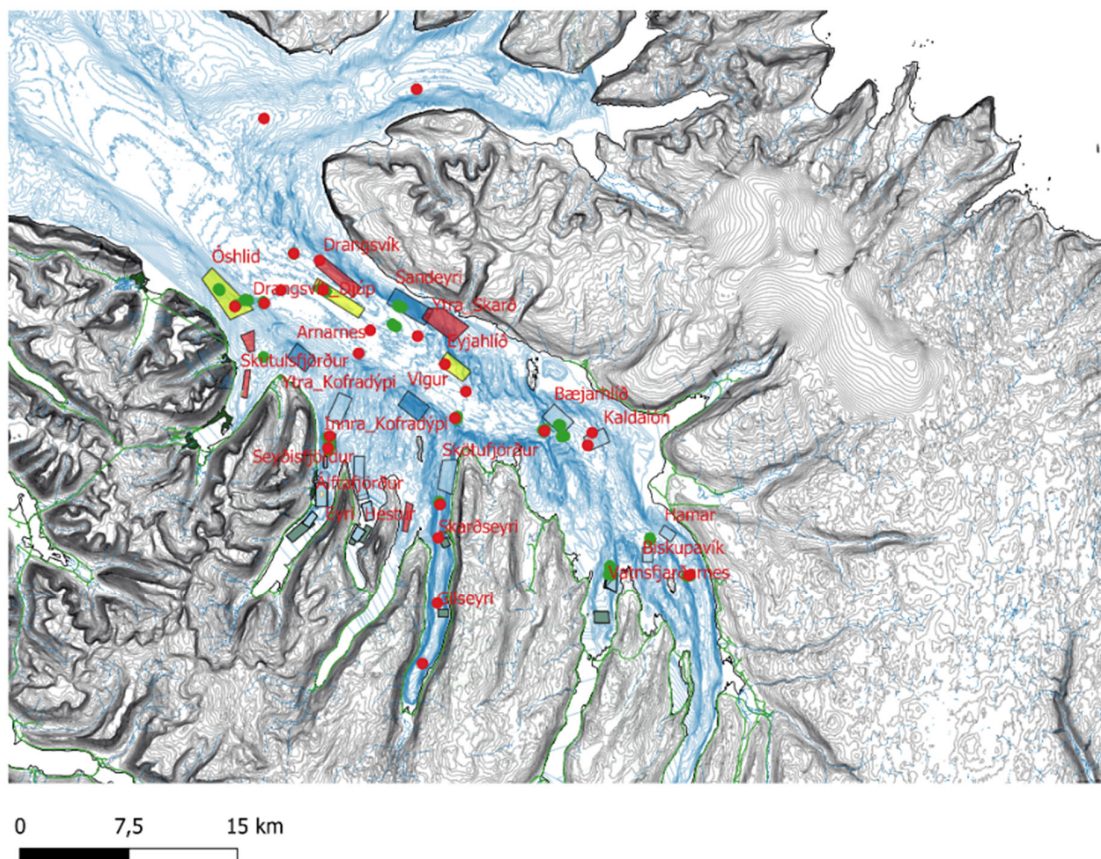
5. mynd. Skilgreind eldissvæði (bláir reitir) í Dýrafirði. Gulir reitir tákna kvíassvæði og dökkir punktar innan þeirra tákna staðsetningu eldiskvía Arctic Sea Farm hf (gögn frá 2020). Rauður punktur táknar sýnatökustöð frá 2019 leiðangrinum.

Ísafjarðardjúp

Ísafjarðardjúp (3 og 6 mynd) er stærsti fjörður Vestfjarða eða um 75 km frá mynni til innsta fjarðarins, Ísafjarðar og er flatarmál fjarðarins alls um 650 km². Breiðast er Ísafjarðardjúp við mynni eða rúmir 20 km. Um miðju Ísafjarðardjúps liggur áll sem er um 110 – 130 m djúpur, en mesta dýpi er 163 m (Sólveig R. Ólafsdóttir *et al.* 2017 a). Meðaldýpi í köntum djúpsins er á bilinu 40 – 60 m. Sunnan til í Ísafjarðardjúpi eru níu innfirðir og norðan til er einn innfjörður.

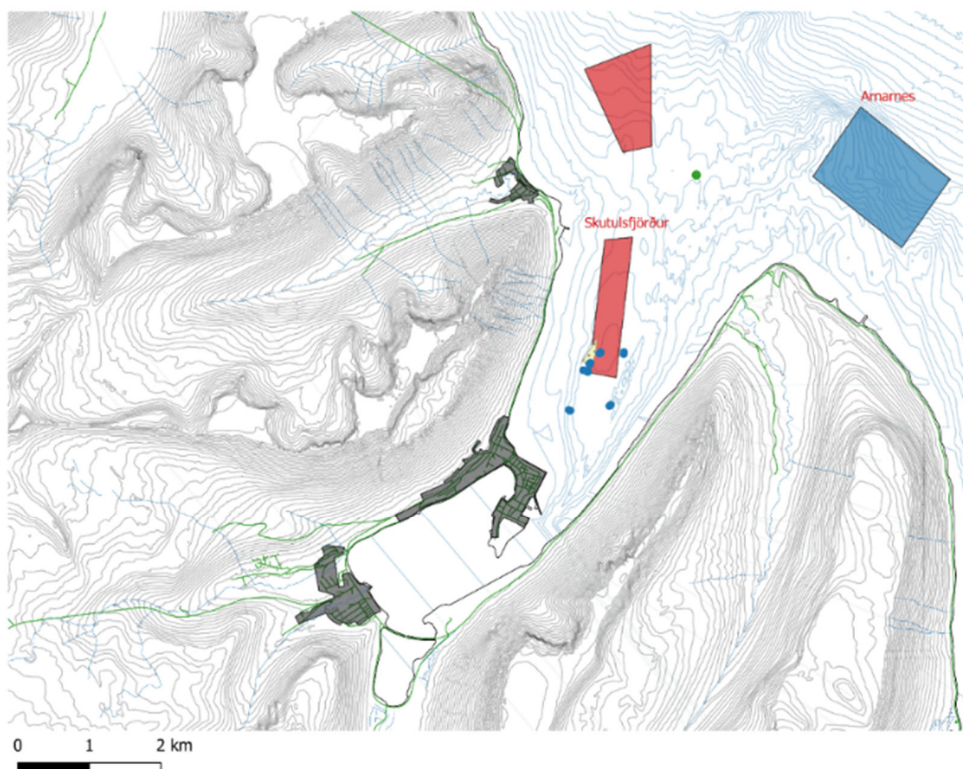
Mælingar Hafrannsóknastofnunar á ýmsum eðlis og efnafræðilegum breytum benda til þess að breytileiki sé í lagskiptingu sjávar í djúpinu m.t.t. staðsetningar. Þannig að yst í Ísafjarðardjúpi sé lagskipting þegar snjóbráðnun á sér stað, en annars sé sjórinn þar að jafnaði uppblandaður. Lagskipting verður svo meira áberandi eftir því sem innar dregur í Djúpið og er orðin viðvarandi nánast allt árið innst (sbr. Ísafjörður). Líkt og almennt gildir um Vestfirði liggur megin straumur inn fjörðinn sunnan megin og út hann norðan megin. Fyrir liggja straummælingar með straumsjá sem Hafrannsóknastofnun hefur framkvæmt í samvinnu við Hraðfrystihúsið Gunnvöru vegna fyrirhugaðs fiskeldis í Djúpinu. Samkvæmt þessum mælingum var meðal straumur lítill eða frá $\sim 1 - 3 \text{ cm s}^{-1}$ og var mestur straumur við botninn (Steingrímur Jónsson og Héðinn Valdimarsson, 2015).

Samkvæmt rannsóknum fyrir burðarþol fyrir fiskeldi kom í ljós að súrefnisstyrkur í botnlagi fór lægst niður í $4,3 \text{ mL L}^{-1}$ og er talið að fjörðurinn geti borið allt að 30.000 tonna lífmassa af eldislaxi á ári án þess að áhrifin verði verulega neikvæð (Sólveig R. Ólafsdóttir *et al.* 2017 a).



6. mynd. Skilgreind eldissvæði sem hafa verið samþykkt eða sótt hefur verið um í Ísafjarðardjúpi. Gulir reitir tákna eldissvæði Arnarlax, bláir Arctic Sea Farm, grænir Fjarðarlax, dökk grænir Aquafuture, ljósbláir Háafell og rauðir reitir eru svæði Hábrúnar. Grænir punktar tákna kjarnastöðvar sem teknar voru 2018 en rauðir punktar tákna kjarnastöðvar frá 2019 (októberleiðangrar).

Skutulsfjörður



7. mynd. Skilgreind eldissvæði Hábrúnar í Skutulsfirði. Gulur reitur táknar eldissvæðið sem var í notkun árið 2018 (júní) þegar kjarnar voru teknir nálægt og fjær eldiskvíum. Svartir punktar innan gula reitsins tákna þáverandi staðsetningu eldiskvíá Hábrúnar. Bláir punktar tákna sýnatökustaði 2018 (júní) en sá græni táknar sýnatökustað frá 2019 (október).

Skutulsfjörður (3 og 7 mynd) er einn af innfjörðum Ísafjarðardjúps sem liggur vestast þeirra fjarða sem ganga suður úr djúpinu. Fjörðurinn er 24,7 km² að flatarmáli og er breidd hans við mynni 3,1 km. Lengd hans er um 7,5 km frá mynni til botns. Meðal dýpi er 15 – 24 m og er mesta dýpi 24 m (Vefur Hafrannsóknastofnunar – Fjarðarannsóknir – Skutulsfjörður).

Við fjörðinn stendur kaupstaðurinn Ísafjarðarkaupstaður og bjuggu 2.635 manns árið 2018 (Hagstofa Íslands, mannfjöldi 2018). Óhreinsað klóak afrennsli hefur runnið í fjörðinn frá upphafi byggðar. Einnig hafa í gegnum áruna rás verið starfræktar fisk og rækjuvinnsur í bænum sem losa lífrænt efni í sjó allan ársins hring.

Aðferðir

Sýnataka

Tafla 2. Fjöldi sýna (kjarnar og lífrænt efni) í leiðöngrum Hafrannsóknastofnunar 2018 – 2019 í Arnarfirði, Ísafjarðardjúpi, Dýrafirði og Skutulsfirði.

Svæði	Sýnatökutímabil	Fjöldi kjarna (n)	Lífrænt efni – fjöldi sýna (n)
Arnarfjörður	október 2018 og 2019	84	42
Dýrafjörður	október 2019	3	0
Skutulsfjörður	júní 2018	21	21
Ísafjarðardjúp	október 2018 og 2019	129	57
Samtals		237	78

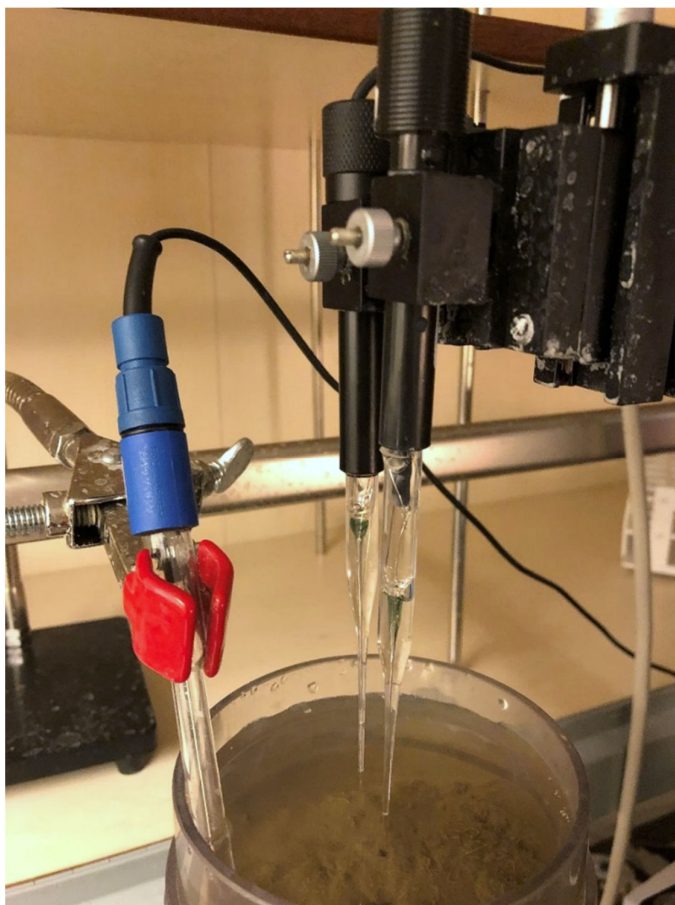
Við sýnatökuna var annars vegar notaður kjarntaki (gravity corer) og hins vegar margfaldur kjarntaki (multi-corer) sem virka báðir á þann hátt að þegar kjarntakinn lendir á mjúkum botni þrýstist rör (7 – 10 cm breitt) niður í setið. Setinu er svo haldið föstu í rörinu á meðan kjarntakinn er hífður frá botni og tekinn um borð í skip. Þannig helst setsýnið mjög lítið raskað.

Farnir voru fjórir leiðangrar til sýnatöku (Tafla 2). Sá fyrsti var í júní 2018 þegar farið var á rækjubátnum Val ÍS og 21 kjarnasýni tekin í Skutulsfirði. Þar af voru þrír kjarnar teknir upp við eldiskvíar en hinir 18 fjær kvíum og flestir voru ekki staðsettir í straumstefnu frá kvíunum og ættu því að endurspegla fjarsvæði Skutulsfjarðar.

Einnig voru farnir tveir leiðangrar með RS Bjarna Sæmundssyn RE 30 í október 2018 og október 2019 (Tafla 2). Auka sýnatökuferð var farin í janúar 2019. Tilgangur sýnatökunnar í janúar 2019 var að ná setsýnum í greip (greining botndýra) og sjósýnum við botn á Tjaldanesi. Tjaldanes er eitt af eldissvæðum Arnarlax í Arnarfirði (3 og 4 mynd) sem hafði verið hvílt í meira en eitt ár þegar farið var í leiðangur í janúar 2019. Ástæða þessa auka leiðangurs var að við myndatökur á botni svæðisins í október 2018, sáust merki um ofauðgun í formi hvítrar þekju/mottu. Tilgátan var sú að þarna væri brennisteinskær baktería (t.d. *Beggiatoa* spp.) sem þekkt er að þrífist á mörkum súrefnis- og brennsteinislags (H_2S) í seti.



8. mynd. Rör með setsýnum (kjarnar) og loftunarbúnaður.



9 mynd. Örnemar fyrir súrefni og pH mælingar, ásamt viðmiðunarnema.

Geymsla sýna

Farið var mjög varlega með kjarnasýnin til þess að minnka upprót sets til hins ítrasta. Í rannsóknastofu voru sýnin sett í kælskáp sem stilltur var á sama hitastig og mældist við botn sýnatökusvæðanna (2 – 5 °C). Notaður var loftunarbúnaður til þess að koma í veg fyrir að sýnin yrðu súrefnislaus í kælinum. Búnaðurinn samanstóð af öflugri loftdælu, súrefnisslöngum, töppum (festa slöngur á rörin) og margföldum krana, eða dreifikistu (9. Mynd). Loftunarslöngum var haldið í sjóhluta sýnisins, fjarri yfirborði setsins. Sýnin voru geymd í kæli og vel loftuð í um 12 – 18 klst þar til mælingar á rannsóknarstofu hófust. Biðtími frá sýnatöku fram að mælingu er nauðsynlegur til þess að setið nái sem næst náttúrulegu ástandi áður en mælingar hefjast.

Mælingar á lífrænu efni (LOI)

Efstu 3 – 5 cm hvers sýnis (kjarna) voru fjarlægðir og frystir fyrir frekari vinnslu í landi (Tafla 1). Sýnin voru þurrkuð yfir nótt við 100 °C í þurrkofni (Heraeus®, Thermo Scientific Heraeus UT 6060). Eftir þurrkunina voru álbakkarnir með þurrkuðum sýnum í vigtaðir og niðurstöðurnar skráðar. Síðan voru sýnin brennd í álbökkunum við 550 °C í 2 klst (Heraeus®, Thermo

Scientific™ K 114 Chamber Furnaces) (Heiri *et al.* 2001). Þegar hitastig sýnanna hafði náð stofuhita voru þau ásamt álbakkanum vegin og skráð. Eftirfarandi jafna var notuð til þess að meta hlutdeild lífræns efnis í sýnunum:

$$\text{Hlutfall lífræns efnis (\%)} = \left(\frac{\text{Þyngd sýnis fyrir brennslu (g)} - \text{Þyngd sýnis eftir brennslu (g)}}{\text{Þyngd sýnis eftir brennslu (g)}} \right) * 100$$

Í þessari skýrslu eru kynntar niðurstöður á magni lífræns efnis frá október 2018 (Tafla 2 og 3). Sýni sem tekin voru árið 2019 eru geymd í frysti en verða mæld og brennd við fyrsta tækifæri til þess að hægt sé að bera saman firðina milli ára.

Mælingar með örnemum (microsensors)

Tækjabúnaður

Framkvæmdar voru mjög nákvæmar mælingar með tækja- og hugbúnaði (Micro Profiling System) frá UNISENSE í Danmörku. Búnaðurinn samanstendur af hugbúnaði (SensorTrace Suite software), höfuðstöð (multimeter), magnara (amplifier), stýribúnaði (micromanipulator og motorcontroller) og ýmsum örnemum (microsensors) (t.d. mynd 9).

Súrefnis (O₂) örneminn (oxygen microsensor) er „Clark type“ mælir sem mælir hlutþrýsting súrefnis (partial pressure). Mælirinn nemur seyti (diffusion) súrefnis yfir sílíkon himnu. Inni í örnemanum er annars vegar rafskaut (cathode) sem afoxar súrefni og hins vegar viðmiðunar silfur (Ag/AgCl) rafskaut (anode). Oddur örnemans er hárfinn eða 50–100 µm sem gefur mjög nákvæma upplausn í mælingum.

Brennisteinsvetnis (H₂S) örneminn (hydrogen sulfide sensor) er svokallaður „miniaturized amperometric sensor“. Líkt og O₂ örneminn nemur H₂S örneminn hlutþrýsting H₂S í umhverfinu í gegnum sílíkon himnu. Basísk jónaupplausn í nemanum oxar HS⁻ jónir með ferricyanide [Fe(CN)₆]³⁻ í brennistein (S) og ferrocyanide [Fe(CN)₆]⁴⁻. Næmni nemans fyrir H₂S byggir á enduroxun af ferrocyanide á rafskauti í nemanum.

Redoxörneminn er „miniaturized platinum“ nemi og með honum er notaður viðmiðunarnemi (reference electrode). Þegar redox nemanum er komið fyrir í lausn, verður til rafstigull í honum sem miðast við viðmiðunarnemann. Þessi stigull er metill á getu lausnarinnar til þess að taka upp eða gefa frá sér rafeindir (e⁻) og er kallaður oxunar–afoxunar stuðull (Oxidation – Reduction Potential, ORP).

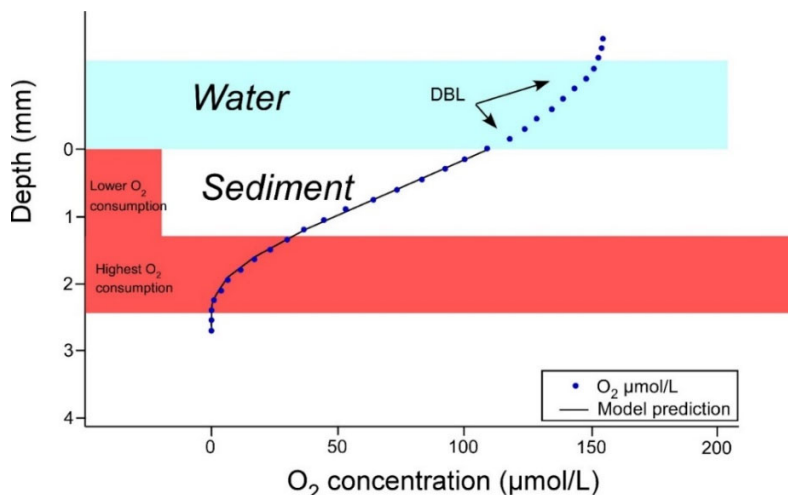
Sýrustigs (pH) örneminn er „miniaturized“ gler örnemi. Rafstigullinn sem neminn mælir gefur til kynna sýrustig lausnarinnar sem hann er settur í. Eins og með redox örnemann er viðmiðunarnemi notaður (reference electrode). Nánar leiðbeiningar og umfjöllun um tækjabúnað má finna á vef UNISENSE (https://www.unisense.com/MicroProfiling_System).

Súrefnismælingar (O_2)

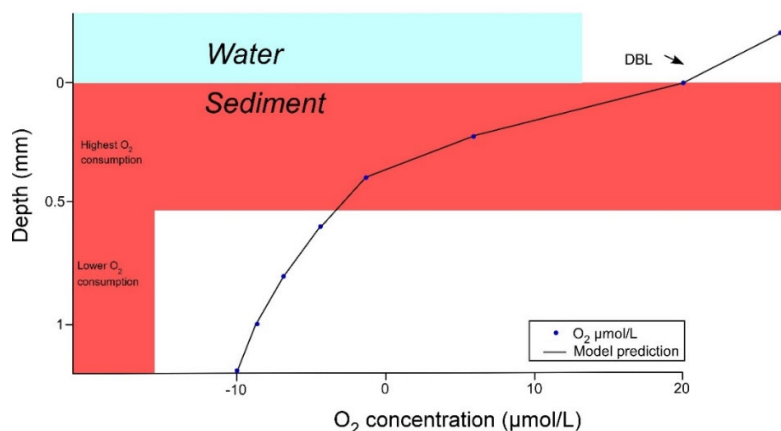
Súrefnismælingar (O_2) voru framkvæmdar á setinu og í vatnsfasanum (water phase). Nokkrar breytur voru metnar m.t.t. mælinganna og líkans frá UNISENSE, sem byggir á fyrsta og öðru lögmáli Fick's (Glud 2008). Þessar breytur voru dýpt súrefnismettunar í setið (oxygen penetration depth) (mm), samþætt súrefnisnotkun/framleiðsla milli sets og vatnsfasa (integrated production / consumption ($\text{nmól cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)), styrkur súrefnis í efsta lagi sets ($\mu\text{mól L}^{-1}$), súrefnisnotkun m.t.t. mismunandi staðsetningar/dýptar í setinu ($\text{nmól cm}^{-3}\text{s}^{-1}$) og heildar súrefnisnotkun í setinu ($\text{nmól cm}^{-3}\text{s}^{-1}$) (Glud 2008, UNISENSE.com).

Mynd 2 sýnir gróflega mun sem búast mætti við milli ómengaðra og mengaðra svæða þegar mælingar með örnemum eru framkvæmdar. Mæling á því hversu djúpt niður í setið súrefnið nær, gefur vísbendingu um lífrænt álag. Nái súrefni (súrefnislag) stutt niður í setið getur það þýtt að lífrænt álag sé talsvert. Mikilvægt er hins vegar að hafa svæði til að bera saman við sem eru ekki undir lífrænu álagi til að meta hversu mikið álagið er. Ástæðan er sú að svæði sem eru að öllu

óröskuð af eldi geta haft grunna súrefnismettun miðað við svæði sem liggja fjær ströndum og eru dýpri. Súrefnisnotkunarmælingar gefa hugmynd um hversu ört niðurbrot lífræns efnis er fyrir tilstuðlan loftháðra baktería. Sé súrefnisnotkunin mikil getur það bent til lífrænnar mengunar. Sömuleiðis getur hár styrkur súrefnis í efsta lagi sets bent til minni mengunar meðan lágur styrkur getur bent til mikillar mengunar. Mælingarnar með örnemum og



10. mynd. Súrefnisprófill úr kjarna frá Óshlíð í Ísafjarðardjúpi. Á y-ás sést set dýpt í millimetrum og á x-ás sést súrefnisstyrkur ($\mu\text{mól L}^{-1}$). Sjá má á myndinni að mesta súrefnisupptakan í setinu á sér á bilinu 1,3 – 2,3 mm dýpi (rauður litur). Einnig sést að súrefnisskortur er fyrir neðan 2.4 mm dýpi og þar eru því aðrir oxarar sem nýttir eru í niðurbrot. Ferill sem táknar súrefnisupptökulagið (DBL) er ekki brattur, heldur aflíðandi sem bendir til hægs niðurbrots. Þessi súrefnisprófill er dæmigerður fyrir gott ástand sets.



11. mynd. Súrefnisprófill úr kjarna frá Kvíassvæði í Skutulsfirði. Á y-ás sést set dýpt í millimetrum og á x-ás sést súrefnisstyrkur ($\mu\text{mól L}^{-1}$). Á þessum prófil nær súrefnislagið niður í u.þ.b. 0,3 mm og að mesta súrefnisnotkunin er efst í prófilnum (rauður litur), rétt neðan við vatnsfasann. Minni súrefnisnotkun er neðar í prófilnum og súrefnisupptökulag vatnsins (DBL – diffusion boundary layer).

Taka skal sérstaklega eftir gildum á x-ás þar sem sést hversu lítið súrefni mældist í þessu sýni miðað við mynd 10.

viðeigandi hugbúnaði, bjóða upp á möguleikann að brjóta upp súrefnisupptökumælingar m.t.t. dýpis. Sé súrefnisnotkun mikil í efsta lagi setsins, getur það bent til þess að lífræn mengun sé til staðar og/eða að náttúrulegt niðurbrot sé mikið eins og sést oft á vorin. Í minna menguðu seti er líklegra að niðurbrotið sé meira neðar í prófílum en efst í honum.

Sjá má á 10 mynd dæmigerðan súrefnisprófíl frá Ísafjarðardjúpi þar sem niðurbrot var minna í efsta lagi sets en í neðri lögum þess. Aftur á móti sýnir 11 mynd dæmigerðan súrefnisprófíl fyrir kjarna þar sem lífrænt álag er mjög mikið (kvíðsvæði í Skutulsfirði). Þar má sjá að niðurbrotið er mest efst í setinu og súrefnisstyrkur í vatnsfasa og seti mjög lágur.

Afoxunarmættismælingar (redox potential - Eh)

Mælingar á afoxunarmætti (redox potential) hafa verið notaðar til þess að meta lífrænt álag. Mismunandi afoxunarmætti hefur verið tengt við mismunandi oxara. Sem dæmi má nefna að sé afoxunarmættisgildið hátt bendir það til þess að líklega sé súrefni til staðar í setinu og ástand þess gott. Hins vegar sé afoxunarmættið lágt (jafnvel neikvæð gildi) bendi það til þess að aðrir oxarar en súrefni séu ráðandi eins og t.d. súlfat (SO_4^{2-}) sem getur valdið því að út losni brennisteinsvetni (H_2S) (Aller 2004).

Sýrustig (pH)

Sýrustig (pH) í seti er oftast lægra sé mengun mikil og ef mikið niðurbrot á sér stað. Niðurbrotsbakteríur skilja út koltvísýring (CO_2) vegna öndunar sem lækkar sýrustigið í setinu (Wei-Jun *et al.* 2011). Vöktunarstaðlar fyrir eldissvæði miða við að notuð séu sýrustigs og redox gildi til þess að gefa svæðum einkunn m.t.t. gæða/heilbrigðis.

Brennisteinsvetni (H_2S)

Styrkur brennisteinsvetnis (H_2S) í seti er oft notaður til þess að meta lífrænt álag og séu gildin há, bendir það til loftfirrðrar öndunar baktería sem nota súlfat (SO_4^{2-}) sem oxara. Þessar bakteríur skilja út H_2S við niðurbrot á súlfati. Hafa ber í huga að í seti frá ómengduðum svæðum mælist H_2S neðarlega í setinu og telst það eðlilegt. Munurinn á menguðum og ómengduðum svæðum er þó sá að brennisteinsvetni mælist ofarlega í seti mengaðra svæða miðað við svæði þar sem engin mengun er.

DNA greining á bakteríum í seti

Sjósýnum og seti sem var safnað í janúar 2019 vegna hvítrar botnþekju sem sást á myndefni frá Tjaldanesi fyrr um haustið voru unnin af samstarfsaðilum í MATÍS. Sýnin voru fryst strax eftir sýnatökuna til þess að koma í veg fyrir skekkju í greiningu. Sýnin voru síuð í gegnum fínann síupappír og erfðaefni baktería var magnað og síðar raðgreint. Notast var við PureLink™ Microbiome DNA Purification Kit (ThermoFisher Scientific) við einangrun á DNA úr seti og MasterPure™ Gram Positive DNA Purification Kit (Epicentre®, Illumina company) við

einangrun á DNA úr sjósýnum. Raðgreiningar voru svo bornar saman við uppfærða útgáfu MATÍS af Illumina MiSeq system gagnagrunni (Illumina Support Center, 16S Metagenomic Sequencing Library Preparation 15044223 B).

Greining gagna og framsetning

Notast var við tölfraeðiforritið R (3.5.1) ásamt viðmóttinu R studio við gagnagreiningu. Til myndvinnslu var forritið CANVAS 11 m.a. notað og Qgis við kortavinnslu.

Sýnataka sem fór fram í júní 2018 í Skutulsfirði var fyrst og fremst hugsuð sem prófun á aðferðum og tækjum fyrir sýnatöku sem fór fram haustin 2018 og 2019. Þar af leiðandi, eru gögn sem söfnuð úr þessum þremur fjörðum ekki að öllu leyti samanburðarhæf. Í gagnagreiningunni er lögð áhersla á að bera saman Arnarfjörð og Ísafjarðardjúp en komið er inn á niðurstöður frá Skutulsfirði og í Dýrafirði. Megin tilgangur verkefnisins er þó ekki að bera þessa firði saman sérstaklega heldur verður gerður innbyrðis samanburður m.t.t. tíma og álags frá fiskeldi. Samanburðurinn á fjörðunum í þessari skýrslu er gerður vegna þess að þetta er í fyrsta sinn sem þessi aðferð með örnemum er notuð hér á botnset fjarða.

Þar sem markmið verkefnisins er að meta hvort að starfssemi sjókvíaeldis í íslenskum fjörðum hafi áhrif á fjar umhverfi var nauðsynlegt að gera mat á lífrænu álagi frá eldi. Við þetta mat var sýnatökustöðvum Arnarfjarðar skipt upp í fjóra megin flokka (0 – 3 álag) með tilliti til þess hvort þær væru nálægt eldissvæðum, í straumstefnu frá þeim (megin straumar), djúpstöðvar eða hvort þær væru teknar við hvíld svæði. Stöðvar gátu legið á milli flokka og fengið einkunn í heilum og hálfum tölum við gagnagreininguna (Tafla 3). Sýnin voru tekin allt frá um 260 metra frá ystu eldiskvíum upp í marga kílómetra frá þeim.

Tafla 3. Flokkunarkerfi fyrir mat á lífrænu álagi m.t.t. staðsetninga sýnatökustöðva og útjaðri eldiskvíasvæðis (akker) í Arnarfirði á þeim tíma sem sýnin voru tekin. Allar stöðvarnar lágu utan vöktunarsvæða fiskeldisfyrirtækja.

Mat á álagi	Dæmi um viðmið við mat á lífrænu álagi	Dæmi um stöðvar
0	– Stöðvar eru hvorki í straumstefnu eldis né djúpstöðvar	– Stöð 926 (2019) yst í Arnarfirði
1 - 1,5	– Stöðvar sem eru lengst allra stöðva frá eldi en í straumstefnu þess – 2500 m eða meira frá eldi – Hvíld svæði	– Tjaldanes (hvílt svæði) utan straumstefnu (2018 gögn)
2 - 2,5	– Stöðvar 1000 - 2500 m frá eldi (akkerum) og í straumstefnu (utan við mörk eldissvæða) – Djúpstöðvar	– Djúpstöðvar í Borgarfirði – Stöðvar nálægt Tjaldanesi (2019 gögn)
3	– Alla jafnan um 260 -1000 m* frá akkerum eldiskví eldis og í straumstefnu eldis.	– Nokkrar stöðvar við Hringsdal, Tjaldanes og Steinanes

*eitt stakt sýni var tekið um 100 m frá akkerum á Haganesi 2018 en annars voru sýnin 260-1000 m frá svæðum.

Gögnum var lýst með lýsandi tölfræði (tafla 4) ásamt því gerð voru einföld próf og/eða línuleg líkön á því hvort marktækur munur væri milli meðaltala fjarða, ára eða hvort samband væri milli breyta. Fervikagreiningar (ANOVA – Analysis of variance), fylgniþróf (Pearson's Correlation), línuleg aðhvarfslíkön (linear regression models) voru mest notuð í greiningu gagnanna. Í flestum tilfellum var gerður samanburður milli Arnarfjarðar og Ísafjarðardjúps (án Skutulsfjarðar) en einnig var gerður innbyrðis samanburður í Arnarfirði m.t.t. lífræns álags.

Niðurstöður

Tafla 4. Lýsandi tölfræði (meðaltöl og staðalfrávik) ýmissa umhverfismælinga í seti frá Arnarfirði, Ísafjarðardjúpi (án Skutulsfjarðar), Skutulsfirði og Dýrafirði. Tímasetningar sýnatöku eru í töflu 2.

	Arnarfjörður	Ísafjarðardjúp	Skutulsfjörður	Dýrafjörður
Fjöldi stöðva	28	43	7	1
Fjöldi sýna (kjarnar) (n)	84	129	21	3
Dýpi á sýnatökustað (m)	89,2 ± 10,9	102,6 ± 28,1	22,6 ± 2,42	39 ± 0
Lífrænt efni – sýni frá 2018 (%)	12,28 ± 1,77	9,51 ± 2,16	4,1 ± 1,47	Ekki mælt
Dýpt súrefnislags (O ₂ penetration depth) (mm)	3,30 ± 0,89	3,72 ± 1,06	2,47 ± 0,96	2,5 ± 0,17
Sambætt súrefnisnotkun/framleiðsla í seti O ₂ (integrated production/consumption nmól cm ⁻² s ⁻¹)	- 0,015 ± 0,007	- 0,014 ± 0,006	- 0,019 ± 0,007	- 0,026 ± 0,003
Styrkur súrefnis á mörkum sjávar og sets (O ₂ top concentration μmol / L)	160,0 ± 27,3	171,1 ± 30,4	142,3 ± 41,7	152,3 ± 20,12
Notkunarhraði súrefnis (O ₂) í seti (cm ⁻³ s ⁻¹)	- 0,142 ± 0,103	- 0,139 ± 0,144	- 0,224 ± 0,146	- 0,167 ± 0,057
Afoxunarmætti á mörkum sjávar og sets (Eh top)	349,3 ± 106,5	372,5 ± 120,2	344 ± 91,14	443,8 ± 51,5
Afoxunarmætti á 1 cm dýpi sets (Eh 1 cm)	230,8 ± 121,2	203,9 ± 126,4	36,0 ± 94,8	241,4 ± 86,0
Afoxunarmætti á 2 cm dýpi sets (Eh 2 cm)	151,7 ± 104,2	122,6 ± 97,3	- 57 ± 83,9	132,7 ± 66,6
Afoxunarmætti á 3 cm dýpi sets (Eh 3 cm)	122,5 ± 110,8	88,8 ± 78,9	Ekki mælt	6,9 ± 76,3
Afoxunarmætti á 4 cm dýpi sets (Eh 4 cm)	108,6 ± 106,2	59,3 ± 63,9	Ekki mælt	- 77,7 ± 88,22
Afoxunarmætti á 5 cm dýpi sets (Eh 5 cm)	91,0 ± 120,2	37,1 ± 61,5	Ekki mælt	- 140,4 ± 115,6
Hlutfall sýna með mælanleg mörk súrefnis og súrefnisleysis í seti (oxic – anoxic interface)	32 %	54 %	100 %	100%
Sýrustig (pH) á mörkum sjávar og sets (pH top)	7,52 ± 0,22	7,55 ± 0,24	7,44 ± 0,33	7,78 ± 0,08
Sýrustig (pH) á 1 cm dýpi sets (pH 1 cm)	7,52 ± 0,22	7,43 ± 0,24	7,3 ± 0,20	7,54 ± 0,02
Sýrustig (pH) á 2 cm dýpi sets (pH 2 cm)	7,45 ± 0,23	7,43 ± 0,22	7,2 ± 0,15	7,53 ± 0,015
Brennisteinsvetni á 1 cm dýpi sets (H ₂ S 1 cm)	0,27 ± 0,41	0,11 ± 0,16	50* (3,37) ± 3,55	0,06 ± 0,01
Brennisteinsvetni á 2 cm dýpi sets (H ₂ S 2 cm)	0,37 ± 0,52	0,20 ± 0,26	66,7* (4,6) ± 3,96	0,05 ± 0,01
Brennisteinsvetni á 3 cm dýpi sets (H ₂ S 3 cm)	0,22 ± 0,65	0,24 ± 0,53	Ekki mælt	0,10 ± 0,08
Brennisteinsvetni á 4 cm dýpi sets (H ₂ S 4 cm)	0,22 ± 0,53	0,27 ± 0,28	Ekki mælt	0,10 ± 0,13

* Meðaltöl með 3 sýnum frá kvíasvæðum. Meðaltölin innan sviga er án þessara þriggja sýna (öfgagildi / outliers).

Meðal dýpi sýnatökusvæða í Arnarfirði var um 89 m og 103 m í Ísafjarðardjúpi. Dýpi sýnatökusvæða var talsvert minna í Skutulsfirði eða tæpir 23 m og 39 m í Dýrafirði (Tafla 4).

Magn lífræns efnis (%)

Magn lífræns efnis var að meðaltali 12,3 % í Arnarfirði en 9,5 % í Ísafjarðardjúpi og var munurinn marktækur ($F_{(93,1)} = 43,96$; $p < 0,001$). Hins vegar var meðal magn lífræns efnis í Skutulsfirði lægra eða 4,1 % sem að öllum líkindum skýrist af tímasetningu sýnatökunnar. Ekki var reyndist samband vera á milli mats á lífrænu álagi (Tafla 3) í Arnarfirði og magni lífræns efnis í sýnatöku ársins 2018.

Meðalþykkt súrefnislags (mm)

Meðalþykkt (mm) súrefnislags setsins fyrir bæði sýnatökutímabilin 2018 og 2019, sýndi að það var 3,3 mm niður í setið í Arnarfirði og 3,7 mm í Ísafjarðardjúpi og var munurinn tölfræðilega marktækur milli þessara tveggja fjarða ($F_{(211,1)} = 9,29$; $p = 0,0026$). Einnig mældist marktækur munur á dýpt súrefnislags milli sýnatökutímabila 2018 og 2019, þar sem súrefnislagið náði að meðaltali dýpra niður í setið í mælingum frá 2019 en 2018 ($F_{(211,1)} = 7,9$; $p = 0,005$).

Þykkt súrefnislagsins í sýnum frá Skutulsfirði og Dýrafirði var að meðaltali um 2,5 mm (Tafla 4). Marktækur munur var á milli þykktar súrefnislags í Skutulsfirði miðað við Arnarfjörð og Ísafjarðardjúp ($p < 0,001$). Ekki var unnt að prófa tölfræðilega gögnin frá Dýrafirði vegna þess hversu fá sýni voru tekin þar ($n = 3$).

Með auknu dýpi á sýnatökustöðum í Ísafjarðardjúpi mældist súrefni dýpra niður í setið og var það samband marktækt ($t = 2,6$; $p = 0,01$). Hins vegar var þetta samband dýpis og súrefnislags ómarktækt innan Arnarfjarðar ($p > 0,05$). Ekki reyndist fylgni milli annara súrefnisbreyta og dýpis sýnatökusvæða.

Marktæk fylgni var á milli þykktar súrefnislags (mm) og eftirfarandi: súrefnisupptöku frá vatnsfasa (integrated production / consumption) ($t = 4,9$; $p < 0,001$), súrefnisstyrks í vatnsfasa ($t = 5,9$; $p < 0,001$), afoxunarmættis í vatnsfasa ($t = 2,37$; $p = 0,019$) ásamt styrks brennisteinsvetnis í 1 og 2 cm dýpi sets ($t = -2,6$; $p = 0,01$ og $t = -2,54$; $p = 0,012$). Ekki var marktæk fylgni milli þykktar súrefnislags (mm) og afoxunarmættis í 1 og 2 cm dýpis í seti.

Samband mats á lífrænu álagi (Tafla 3) frá eldissvæðum í Arnarfirði og þykktar súrefnislags í seti fjarðarins reyndist marktækt, á þá leið að eftir því sem sýnatökustöðvarnar lágu nær eldissvæðum var súrefnislagið þynnra ($t = -3,16$; $p = 0,002$). Ekki var marktækur munur á áhrifum álags í Arnarfirði og súrefnislags milli áranna 2018 og 2019.

Súrefnisupptaka í vatnsfasa (integrated production/consumption)

Súrefnisupptaka sets frá vatnsfasa var að meðaltali $-0,015$ ($\text{nmól cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) í Arnarfirði en $-0,014$ ($\text{nmól cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) Ísafjarðardjúpi og var munurinn tölfræðilega ómarktækur ($p > 0,05$).

Í Skutulsfirði og Dýrafirði var súrefnisupptaka setsins mun hærri en í Arnarfirði og Ísafjarðardjúpi (Tafla 4).

Súrefnisupptaka sets frá vatnsfasa ($\text{nmól cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) var marktækt meiri eftir því sem mat á lífrænu álagi í Arnarfirði var herra ($t = -2.8$; $p = 0,006$).

Styrkur súrefnis í vatnsfasa.

Styrkur súrefnis í vatnsfasa (mörk sets og sjávar) var $160 \mu\text{mól L}^{-1}$ í Arnarfirði en $171 \mu\text{mól L}^{-1}$ í Ísafjarðardjúpi og var munurinn marktækur ($F_{(211,1)} = 7,77$; $p = 0,0058$). Mun lægri styrkur súrefnis mældist í sýnum frá Dýrafirði og Skutulsfirði (Tafla 4). Ekki var samband milli mats á lífrænu álagi frá eldi í Arnarfirði og styrks súrefnis í vatnsfasa þar.

Súrefnisnotkunarhraði sets (rate)

Súrefnisnotkunarhraði setsins var $-0,142 \text{ (cm}^{-3} \text{ s}^{-1})$ í Arnarfirði en $-0,139 \text{ (cm}^{-3} \text{ s}^{-1})$ í Ísafjarðardjúpi og var munurinn ómarktækur ($p > 0,05$) (Tafla 4). Lífrænt álag eldis í Arnarfirði hafði marktæk áhrif á súrefnisnotkunarhraða setsins ($\text{nmól cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$) ($t = -2,24$; $p = 0,028$). Í Dýrafirði og Skutulsfirði var súrefnisnotkunarhraðinn mun hærri en í Arnarfirði og Ísafjarðardjúpi (Tafla 4).

Ef litið er á hvar í setinu (prófilnum) súrefnisnotkunin var mest, mátti sjá að hún var mest í neðri hluta sets eða í um 80 – 90 % sýna, í tilfelli Arnarfjarðar og Ísafjarðardjúps. Hins vegar var skiptingin jöfn í sýnum frá Skutulsfirði (50% sýna neðarlega í seti og 50 % sýna efst í seti) (Tafla 4). Mest súrefnisnotkun var í efstu lögum sets sýnanna frá Dýrafirði.

Afoxunarmætti (redox potential)

Meðaltal mælinga afoxunarmættis í vatnsfasa setsins (mörk sets og sjávar) var 349 mV í Arnarfirði og 372 mV í Ísafjarðardjúpi og reyndist ekki tölfræðilega marktækur munur milli fjarða ($p > 0,05$). Sama gildi um afoxunarmætti í 1 cm dýpi sets að munurinn var ómarktækur ($p > 0,05$). Hins vegar var afoxunarmættið í Arnarfirði á 2 cm dýpi sets marktækt öflugra í Arnarfirði miðað við Ísafjarðardjúp ($F_{(211,1)} = 4,37$; $p = 0,038$).

Munur var á mælingum afoxunarmættis milli áranna 2018 og 2019 á 1 og 2 cm dýpi ($F_{(211,1)} = 6,59$; $p = 0,011$ og $F_{(211,1)} = 4,23$; $p = 0,041$) á þann hátt að afoxunarmættið reyndist herra fyrir 2019 en 2018.

Mælingar á afoxunarmætti lengra niður í setið en 2 cm voru skoðaðar sérstaklega í sýnatökunni 2019. Afoxunarmætti var herra í 3 cm dýpi sets í Arnarfirði miðað við Ísafjarðardjúp ($F_{(112,1)} = 3,55$; $p = 0,06$) en þó rétt tölfræðilega ómarktækt. Einnig í 4 og 5 cm dýpi reyndist afoxunarmættið öflugra í Arnarfirði miðað við Ísafjarðardjúp ($F_{(109,1)} = 9,32$; $p = 0,003$).

og $F_{(105, 1)} = 9,46$; $p = 0,003$). Aðeins í sýnum frá Dýrafirði reyndist meðal afoxunarmættið á 4 og 5 cm dýpi neikvætt, en einungis var um þrjú sýni að ræða (Tafla 4).

Afoxunarmætti sýna frá Skutulsfirði var talsvert lægra en í Ísafjarðardjúpi og Arnarfirði (Tafla 4) og reyndist samanburður á milli allra þátta mjög marktækur ($p < 0,001$).

Einungis var hægt að mæla núll gildi afoxunarmættis (0 mV) í 32% sýna frá Arnarfirði en það var hægt í 54% tilfella sýna frá Ísafjarðardjúpi. Hægt var að mæla núllpunktinn í öllum (100%) sýnum frá Skutulsfirði og í Dýrafirði (Tafla 4). Örnemar (microsensors) sem notaðir voru til þess að mæla afoxunarmætti reyndust ekki nógu langir til þess að mæla núllpunktinn ef hann lá neðar en 6 – 8 cm í setinu.

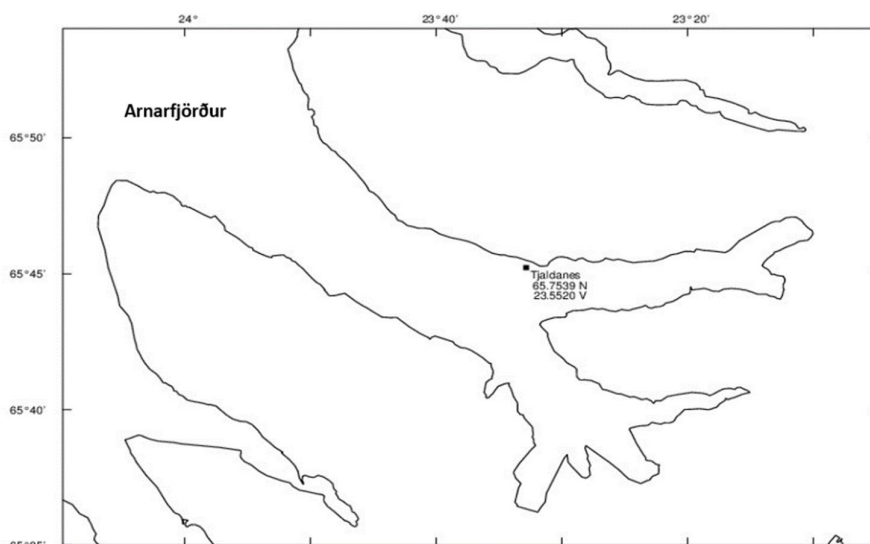
Ekki var marktækt samband milli afoxunarmættis ofan á setinu og á 1 cm dýpis sets við lífrænt álag í Arnarfirði. Hins vegar reyndust mælingar marktækt lægri með auknu álagi þegar litið var á 2 cm dýpi sets ($t = -2,23$; $p = 0,029$). Ekki reyndust sambönd milli mats á lífrænu álagi frá eldi og afoxunarmættis á 3 – 5 cm dýpi sets í Arnarfirði ($p > 0,05$).

Sýrustig (pH)

Sýrustig (pH) var ekki marktækt frábrugðið milli Arnarfjarðar, Ísafjarðardjúps eða Skutulsfjarðar. Þetta átti við allar sýrustigsbreyturnar (Tafla 4). Ekki reyndist heldur marktækt samband milli mats á lífrænu álagi í Arnarfirði og sýrustigs í sýnunum ($p > 0,05$). Dýrafjarðarsýnin voru ekki borin saman við hin sýnin sökum lítils úrtaks.

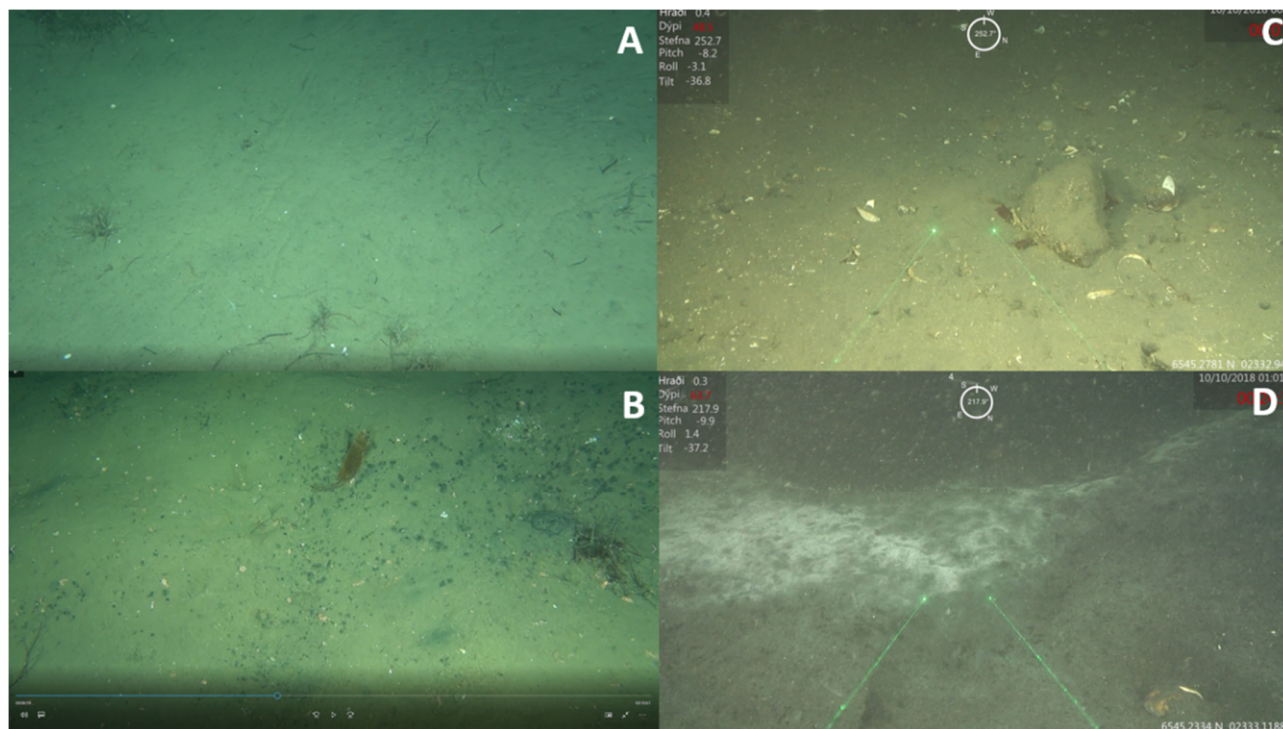
Brennisteinsvetni (H_2S)

Brennisteinsvetni (H_2S) á 1 cm dýpi sets, var að meðaltali $0,11 \mu\text{mól L}^{-1}$ í Ísafjarðardjúpi en $0,27 \mu\text{mól/L}$ í Arnarfirði og var munurinn tölfræðilega marktækur ($F_{(211,1)} = 13,9$; $p < 0,001$). Á 2 cm dýpi sets var brennisteinsvetni að meðaltali $0,37 \mu\text{mól L}^{-1}$ í Arnarfirði en $0,20 \mu\text{mól L}^{-1}$ í Ísafjarðardjúpi og munurinn einnig marktækur ($F_{(211,1)} = 10,8$; $p = 0,001$) (Tafla 4).



12. mynd. Arnarfjörður með nákvæmri staðsetningu (sjá hnit á mynd) erfðasýna á Tjaldanesi.

Mælingar dýpra niður í setið sýndu á hinn bóginn að gildi brennisteinsvetnis í sýnum frá Ísafjarðardjúpi voru marktækt hærri en í Arnarfirði ($W_{(109, 1)}=330$ og 152 , $p<0,001$) (Tafla 4). Ekki var marktækt samband milli styrks brennisteinsvetnis í Arnarfirði og mats á lífrænu álagi ($p>0,05$).



13. mynd. Skjástot af myndbandsupptökum frá Skutulsfirði (A og B) og Arnarfirði (C og D). Set sem bar ekki sjónræn merki lífrænnar mengunar í Skutulsfirði (A), set sem var nálægt eldiskvíum í Skutulsfirði og bar merki lífrænnar mengunar (svartar skellur/punktar) (B), set úr sandi og skeljabrotum í Arnarfirði (C) sem ekki bar merki lífrænnar mengunar og set við Tjaldanes sem bar merki lífrænnar mengunar (hvítar slikjur) (D). Erfðasýni voru tekin frá svæðinu á Tjaldanesi.

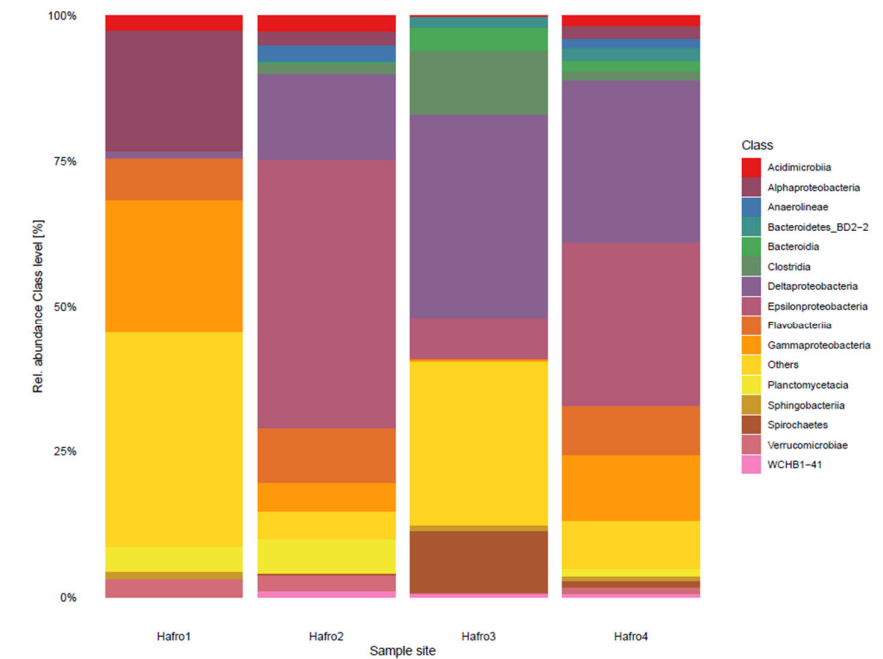
Brennisteinsvetni var hátt í Skutulsfirði eða á bilinu $50 - 66,7 \mu\text{mol L}^{-1}$. Þegar öfgagildi (outliers) frá kvíasýnum voru fjarlægðir úr greiningunni reyndust gildin samt há miðað við Arnarfjörð og Ísafjarðardjúp eða $3,55 - 3,96 \mu\text{mol L}^{-1}$ (ca. 8 – 18 sinnum hærri). Lág gildi brennisteinsvetnis reyndust vera í sýnunum þremur frá Dýrafirði en eins og áður hefur komið fram er ekki hægt að draga ályktanir vegna fárra sýna.

Erfðagreining sýna frá Tjaldanesi

Alls greindust 1123 ólíkar basaraðir baktería og fornbaktería sýnunum fjórum frá Tjaldanesi. Samanburður við gagnagrunna MATÍS gaf niðurstöður í ættkvíslum (genus).

Talsverður munur var á sýni 1 og sýni 4, en sýni 2 og 3 voru lík (viðauki 3) m.t.t. hvaða bakteríur og fornbakteríur fundust í sýnunum.

Flokkar (class) sem innihalda brennisteinskærar bakteríur voru stór hluti af hlutfallslegu magni erfðaefnis í sýnunum, eða frá um það bil 30 – 75% af heildinni (14. mynd).



14 mynd. Hlutfallslegt magn (%) bakteríu DNA algengustu hópa sem greindust í sýnum (sjór við botn) frá Tjaldanesi. Bakteríur með dökk bleik/fjólubláum og (Class: *Epsilonproteobacteria*) fjólubláum (Class: *Deltaproteobacteria*) voru stór partur af heildar bakteríum en þær eru brennisteinskærar. Einnig fannst flokkurinn sem *Beggiatoa* sp. tilheyra en hann er ljósappelsínugulur myndinni (Class: *Gammaproteobacteria*).

Bakteríur sem tilheyra flokkunum *Deltaproteobacteria* og *Epsilonproteobacteria* voru áberandi í sýnunum frá Tjaldanesi. Innan *Deltaproteobacteria* fundust ættkvíslir eins og *Desulfobacter*, *Desulfoconvexum*, *Desulfocapsa* og margar fleiri. Innan *Epsilonproteobacteria* fundust ættkvíslir á borð við *Sulfurovum*, *Sulfurimonas* og fleiri. *Gammaproteobacteria* var einnig meðal algengustu flokkum baktería, en *Beggiatoa* sp. tilheyra þeim flokki (14. mynd).

Umræður

Eins og áður hefur komið fram voru mælingar frá Skutulsfirði og Dýrafirði ekki fullkomlega samanburðarhæfar við Arnarfjörð og Ísafjarðardjúp. Farið var snemma sumars í Skutulsfjörð til prófunar á tækjabúnaði og aðferðum en aðrar sýnatökur fóru fram seint að hausti. Í Skutulsfirði var notaður lítill 30 tonna eikarbátur (Valur ÍS) sem gerði kleift að fara í sýnatöku alveg upp við eldiskvíar. Þarna gafst einstakt tækifæri til þess að ná sýni af grunnu svæði sem fyrirfram var vitað að væri undir miklu álagi vegna fiskeldis. Taka skal sérstaklega fram að ekki er óeðlilegt að eitthvað lífrænt álag sé upp við kvíar og undir þeim á eldistíma. Hversu mikið álag er talið ásættanlegt upp við og undir kvíar fyrir starfsseminna er metið af eldisfyrirtækjum hverju sinni. Sem mótvægisáðgerð við uppsöfnun lífrænna efna er í starfsleyfum fiskeldisfyrirtækja kveðið á um að hvíla skuli eldissvæðin til þess að lífræna efnið nái að brotna niður og botninn nái að endurheimta fyrra ástand sitt.

Sýnataka í Dýrafirði var takmörkuð af tvennum orsökum. Annars vegar vegna þess að erfitt reyndist að taka kjarnasýni þar sem botninn var harður og blandaður. Hins vegar setti vont veður strík í reikninginn og var því nánast ómögulegt að ná kjarnasýnum.

Marktækt meira magn lífræns efnis (%) mældist í Arnarfirði en í Ísafjarðardjúpi. Þekkt er að Arnarfjörður hefur lakari vatnsskipti en Ísafjarðardjúp sem veldur því að súrefnismagn við botn er lágt frá sumri og fram á haust (Sólveig R. Ólafsdóttir *et al.* 2017 a). Lág súrefnismettun við botn í Arnarfirði gæti skýrt hvers vegna meira lífrænt efni mældist í Arnarfirði en í Ísafjarðardjúpi. Niðurbrot er hraðast þegar súrefni er nægt vegna þess að það er öflugur oxari (Glud, 2008). Aðrar ástæður gætu einnig verið tilvist fiskeldis í Arnarfirði en samkvæmt burðarþolsmatslíkani er gert ráð fyrir að um helmingur lífræns efnis (fóður og úrgangur) falli til botns en hinn hlutinn dreifist um vatnsbolinn. Ef fóðurstuðull eldis er 1,2 má gera ráð fyrir að við 5.000 tonna eldi, falli rúmlega 500 tonn af lífrænt bundnu kolefni á botn fjarðarins árlega ásamt öðrum efnum og svipað magn næringarefna leysist upp í vatnsbolnum (Wang *et al.* 2012). Það sem á botninn fellur brotnar að endingu niður og leysist upp.

Burðarþolsmat Hafrannsóknastofnunar gerir ráð fyrir því að Arnarfjörður þoli allt upp í 20.000 tonna framleiðslu á ári án þess að veruleg áhrif verði á súrefnisbúskap fjarðarins. Markmið þessara áframhaldandi rannsókna er að meta hvort mælingar á efnaferlum sets samræmist burðarþolinu. Til þess að ganga úr skugga um hvort lífrænt efni sé tilkomið vegna eldis eða af náttúrulegri uppsprettu væri mögulegt að mæla hlutföll stöðugra samsæta efna eins og kolefnis (^{13}C : ^{12}C), köfnunarefnis (^{15}N : ^{14}N) og brennisteins (^{34}S : ^{32}S) (Peterson, 1999). Til stendur að vinna fleiri sýni með lífrænu efni úr Arnarfirði á næstu mánuðum og þá væri komin betri mælikvarði (vegna fleiri sýna) á það hvort tengsl væru á milli mats á lífrænu álagi frá fiskeldi og magni lífræns efnis (%). Mögulegt er að lífrænt efni berist frá fiskeldi í all nokkra fjarlægð

frá kvíum, en nýleg rannsókn í Berufirði sýndi að um 26% lífræns kolefnis (% C_{org}) var upprunið úr fódri frá fiskeldi á stöð sem var 350 metra í straumstefnu frá eldiskvíum (Eiríksson ofl. 2017). En eins og áður segir þarf að kanna dreifinguna betur og taka tillit til staðbundinna þátta sem geta haft áhrif á dreifingu eins og til dæmis dýpis, strauma, lífmassa eldisfisks og fódurstuðuls.

Magn lífræns efnis var minnst í Skutulsfirði miðað við hina firðina. Þennan mun má líklega rekja til þess að sýnatakan fór fram að sumri til í Skutulsfirði en síðla hausts í Arnarfirði og í Ísafjarðardjúpi. Árstíðarbreytileiki í magni lífræns efnis við botn er tilkominn vegna breytileika á svifþörungablóma, hitastigi, straumum o.fl. Uppsöfnun lífræns efnis eftir sumarblóma svifþörungum skýrir aukningu þess á haustin (Sintes *et al.* 2010).

Þykkt súrefnislags (mm) í seti getur sagt mikið til um lífrænt álag og niðurbrot (Glud 2008). Þetta lag var grynna í Arnarfirði en Ísafjarðardjúpi, en líkt og munur á magni lífræna efnisins (%) er munurinn líklegast tilkominn vegna mismunar á aðstæðum fjarðanna. Mögulegt er að eldisstarfssemi hafi einhver áhrif þar sem þykkt lagsins var marktækt minni eftir því sem mat á lífrænu álagi (staðsetning sýna m.t.t. kvía og straumstefnu) jókst.

Súrefnislagið var dýpra niður í setið í báðum fjörðum þegar mælingar árið 2019 voru bornar saman við 2018. Líklega er því um náttúrulegan breytileika að ræða úr því að sami munur er til staðar í báðum fjörðum milli ára.

Einnig var samband milli þykktar súrefnislags og dýpi sýnatökustöðvanna (m) á þann hátt að súrefnislagið var þykkara á dýpri stöðvum. Það ber þó að hafa í huga að flestar stöðvarnar í Ísafjarðardjúpi voru á meira dýpi en stöðvarnar í Arnarfirði og var munurinn á súrefnisluginu marktækt frábrugðin milli fjarða. Munurinn m.t.t. dýpis gæti því verið tilkominn vegna munar á fjörðunum. Hins vegar er þekkt að súrefnislag verði almennt þykkara eftir því sem dýpi sýnatökustöðvanna eykst. Frekari gagnaöflun t.d. innan sama fjarðar gæti leitt í ljós hvort dýpi skipti máli fyrir þykkt súrefnislags þar.

Súrefnislagið í seti Skutulsfjarðar var áberandi grunnt en eins og áður hefur komið fram er fjörðurinn grunnur og lífrænt álag þar er og hefur verið talsvert í mörg ár vegna byggðar og iðnaðarstarfssemi. Í sýnum sem tekin voru við kvíar náði súrefnislagið einungis niður á 0,75 mm dýpi. Þessi tenging milli súrefnislags og fiskeldis kemur ekki á óvart þar sem súrefni er sá oxari sem fyrst er gengið á við niðurbrot lífræns efnis. Myndbandsupptökur af sama svæði leiddu í ljós að svartar skellur og fódurleifar voru á svæðinu og telst það ekki óeðlilegt þegar eldisstarfssemi er í hámarki eins og hún var á tíma sýnatökunnar (13. mynd).

Í Dýrafirði voru aðeins tekin þrjú sýni af sömu stöðinni. Þar var súrefnislagið fremur grunnt eða um 2,5 mm en ekki skal draga miklar ályktanir þegar um svo fá sýni er að ræða. Botninn í Dýrafirði reyndist harður og því þarf að undirbúa næstu sýnatöku betur og jafnvel nálgast hana

á annan hátt eins og t.d. með myndbandsupptökum af botni (sbr. ISO 19493) sem ekki var hægt að framkvæma vegna veðurs síðastliðið haust.

Fylgni var á milli þykktar súrefnislagsins og súrefnisupptöku á þann hátt að með aukinni súrefnisupptöku var þykkt súrefnislagsins minni. Á sama hátt var súrefnislagið í setinu þynnra eftir því sem styrkur súrefnis í vatnsfasa var minni. Þykkt súrefnislagsins var einnig minni eftir því sem afoxunarmættið var veikara í vatnsfasanum. Allar þessar niðurstöður staðfesta sambandið á milli súrefnis, súrefnisupptöku (t.d. vegna lífræns álags) og afoxunarmættis í seti og við yfirborð þess. Því má gera ráð fyrir að eftir því sem lífrænt álag eykst muni súrefnisupptaka aukast og afoxunarmættið lækka enn frekar. Aðrir þættir en lífrænt álag geta haft áhrif á þetta eins og t.d. uppblöndun og vatnsskipti í fjörðum eins og áður hefur verið nefnt.

Styrkur H_2S í seti og þykkt súrefnislagsins voru einnig tengd á þann hátt að með hærri styrk H_2S var súrefnislagið grynna. Það telst eðlilegt því að ef súrefni er takmarkað taka brennisteinskærar bakteríur sem nýta ekki súrefni við niðurbrotinu og losa t.d. H_2S við niðurbrot á SO_4^{2-} . Styrkur H_2S var hærri í sýnum frá Arnarfirði en í Ísafjarðardjúpi og getur munurinn verið tilkominn vegna súrefnismismunar fjarðanna og vegna annara staðbundinna þátta sem aðgreina þessa tvo firði.

Mat á lífrænu álagi með tilliti til nálægðar og staðsetningar eldissvæða í Arnarfirði og dýpt súrefnislags var marktækt tengt. Þannig var súrefnislagið þynnra eftir því sem mat á lífrænu álagi eldis var talið meira. Þau svæði sem fengu hæstu einkunn í mati á lífrænu álagi voru t.d. svæði við Hringsdal (ca. 260-1000 m frá kvíum) þar sem fiskeldi hefur verið í gangi hvað lengst. Þetta svæði var hvílt í styttri tíma en önnur eldissvæði eða í um þrjá mánuði á milli kynslóða. Því kom það ekki á óvart að þar væri fremur þunnt súrefnislag miðað við önnur svæði innan Arnarfjarðar. Engin sýni voru tekin innan eldissvæða (innan akkera) og því eru sýni í þessari rannsókn tekin af fjarsvæðum. Aðeins eitt stakt sýni frá nágrenni Haganess var tekið um 100 m frá kvíum (2018) en það hefur ekki afgerandi áhrif á niðurstöðurnar. Fiskeldisfyrirtækin bera ábyrgð á vöktun sinna svæða og eru niðurstöðurnar aðgengilegar á vefsvæði Umhverfisstofnunar (sbr. vöktunarskýrslur Arnarlax).

Súrefnisstyrkur í vatnsfasa var marktækt hærri í Ísafjarðardjúpi en í Arnarfirði og kemur sú niðurstaða ekki á óvart þegar litið er á heildarmyndina og aðrar rannsóknir. Fyrri rannsóknir Hafrannsóknastofnunar (Sólveig R. Ólafsdóttir *et al.* 2017 a) hafa bent á þennan mun á súrefnisstyrk botnsjávar sem tilkominn er vegna þröskuldar í botni Arnarfjarðar. Ólíklegt má teljast miðað við fyrirbyggjandi gögn að fiskeldi hafi mikil áhrif á súrefnisstyrk í vatnsfasa þar sem ekki voru marktæk tengsl á þessum mælingum og mats á lífrænu álagi.

Súrefnisnotkun var í lang flestum tilfellum ekki mest í allra efstu millimetrum setsins í Arnarfirði eða Ísafjarðardjúpi sem telst mjög gott þar sem um er að ræða sýni frá fjarsvæðum eldis. Sé súrefnisnotkunin mest efst í seti bendir það til niðurbrots á lífrænu efni sem er annaðhvort í miklu magni eða nýfallið til botns (t.d. eftir þörungablóma). Það sést í sýnum frá Skutulsfirði að þar er um helmingur sýnanna með mest niðurbrot efst í setinu. Þau sýni frá Skutulsfirði sem höfðu mestan niðurbrotshraða efst í setinu voru tekin nálægt kvíum. Taka skal fram að það eru eðlilegar niðurstöður miðað við staðsetningu sýnatökunnar og því ekki bornar saman við vöktun á fjarsvæðum í Arnarfirði og Ísafjarðardjúpi. Að sama skapi er ekki hægt að bera Dýrafjarðarsýnin við Arnarfjörð og Ísafjarðardjúp vegna fárra sýna.

Hraði súrefnisnotkunar (rate) var ekki marktækt frábrugðin á milli Ísafjarðardjúps og Arnarfjarðar. Hins vegar var súrefnisnotkunarhraði innan Arnarfjarðar marktækt tengdur mati á lífrænu álagi frá fiskeldi. Niðurstöðurnar bentu því til þess að eftir því sem álag frá eldi jókst kom fram aukning í hraða súrefnisnotkunar.

Afoxunarmættið var ekki frábrugðið milli Ísafjarðardjúps og Arnarfjarðar í vatnsfasa og í 1 cm dýpt setsins. Hins vegar var það öflugra 2 – 5 cm niður í setið í Arnarfirði miðað við Ísafjarðardjúp. Búast hefði mátt við að þessu væri öfugt farið vegna þess að súrefnisbúskapur sjávar í Ísafjarðardjúpi er að öllu jöfnu betri. Hins vegar eru fleiri oxarar en súrefni (t.d. NO_3^- , Fe^{3+}) (1. mynd) sem voru ekki mældir sérstaklega en geta verið mismunandi milli fjarða og því skýrt þennan mun ásamt öðrum náttúrulegum þáttum. Í Skutulsfirði var afoxunarmættið mun lægra en í Arnarfirði og Ísafjarðardjúpi og telst það eðlilegt miðað við aðstæður þar og ekki hægt að bera saman við fjarsvæðin. Afoxunarlag (redox potential layer) þar sem afoxunarmættið fer úr jákvæðri tölu í neikvæða (núll punktur) var mælanlegt í 32% hluta sýna Arnarfjarðar meðan hægt var að mæla 0 gildið í 54% tilfella í Ísafjarðardjúpi. Ráðandi oxarar þar sem afoxunarmættið er jákvætt eru O_2 , NO_3^- , Mn^{4+} , Fe^{3+} en þar sem neikvæð gildi mælast eru SO_4^{2-} , CO_2 oxarar á lífrænt efni (Aller, 2004).

Afoxunarmætti á 2 cm dýpi innan Arnarfjarðar var marktækt lægra eftir því sem mat á lífrænu álagi jókst. Sú niðurstaða passar ágætlega við aðrar niðurstöður tengdar mati á lífrænu álagi eins og t.d. grynna súrefnislags. Ekki voru mælanleg áhrif af mati lífræns álags á afoxunarmætti dýpra en 2 cm niður í setið.

Sýrustig (pH) var ekki frábrugðið milli Arnarfjarðar og Ísafjarðardjúps. Hins vegar var pH aðeins lægra í Skutulsfirði en í hinum fjörðunum sem passar við aðrar niðurstöður Skutulsfjarðar sem benda til lífræns álags. Lífrænt álag í Skutulsfirði veldur því að niðurbrot er talsvert (aukin öndun baktería) og því lækkar pH þegar CO_2 skilst út við öndun. Árstími sýnatökunnar getur einnig haft einhver áhrif á sýrustig þó það sé ólíklega stór þáttur miðað við mengunina.

Brennisteinsvetnisstyrkur var rúmlega helmingi hærri í Arnarfirði en í Ísafjarðardjúpi á 1–2 cm dýpi í seti. Ástæðan getur verið sú að í ákveðinn tíma á hverju ári er súrefni mjög lágt í Arnarfirði og því eru aðrir oxarar ríkjandi að minnsta kosti þann tíma. Brennisteinsvetni losnar þegar bakeríur brjóta niður brennisteinsefnasbönd við öndun. Hækkun í styrk brennisteinsvetnis hefur einnig verið tengd við aukið lífrænt álag, t.d. frá fiskeldi en samkvæmt okkar niðurstöðum var ekki samband milli mats á lífrænu álagi eldis og styrks brennisteinsvetnis í seti.

Greiningar á bakteríu erfðaefni (DNA) í sýnum frá Tjaldanesi sýndu fram á að 30 – 75% af bakteríunum væru brennisteinskærar (sulfur – oxydizing). Leiða má líkur að því að ástæðan sé lífrænt álag eftir fiskeldi á Tjaldanesi en slíkar bakteríur einkenna svæði sem eru undir miklu lífrænu álagi (Mußmann *et al.* 2003). Eldissvæðið á Tjaldanesi hafði verið í hvíld í yfir eitt ár þegar sýnataka fór fram í október 2018. Þessar niðurstöður erfðagreiningarinnar og myndbandsupptökur ásamt vöktunarniðurstöðum fiskeldisfyrirtækjanna benda til þess að mikilvægt sé að kanna svæðisbundna þætti vegna lífræns álags. Þannig getur verið að mismunandi eldissvæði innan sama fjarðar þoli mis mikið lífrænt álag. Því þurfi að hvíla eldissvæðin mis lengi milli kynslóða.

Þar sem ekki er hafið eldi í Ísafjarðardjúpi er gríðarlegur akkur í því að hafa tekið sýni áður en það hefst. Eins og áður hefur komið fram hefur ráðgjöf vegna áhættumats erfðablöndunar verið endurskoðuð sem gæti leitt til þess að eldi hefjist í Ísafjarðardjúpi á næstu árum. Ekki eru til gögn, sambærileg þeim sem lýst er í þessari skýrslu frá Arnarfirði áður en fiskeldisstarfssemi hófst þar. Í vinnslu er svæðaskipting innan Arnarfjarðar og Ísafjarðardjúps þar sem til stendur að skipta fjörðunum upp m.t.t. burðarþolsmats. Rannsóknirnar á seti munu leggja til mikilvæga þekkingu á því hversu vel mismunandi svæði innan fjarða þola lífrænt álag. Einnig munu þær styrkja burðarþolsmatið í heild sinni. Hægt verður með vöktun að segja til um raunveruleg áhrif fiskeldis á set og nýta þekkinguna til að öðlast heildarmynd á umhverfisáhrifum sjókvíaeldis.

Ályktanir

- Niðurstöðurnar í þessari rannsókn benda til breytileika í efnaeiginleikum botnsets á milli Arnarfjarðar og Ísafjarðardjúps.
- Munur var á milli áranna 2018 og 2019 þegar litið var til súrefnismælinga botnsets í Arnarfirði og Ísafjarðardjúpi. Súrefnismælingar bentu til betra ástands 2019 miðað við 2018. Þó skal taka fram að ástandið var gott bæði árin.

- Áhrifa eldis á súrefnisbúskap sets gætti mest næst eldiskvíum og í straumstefnu frá þeim. Þau sýni sem voru tekin næst fiskeldi voru á bilinu 260-1000 m frá ystu kvíum.
- Niðurstöður erfðagreininganna benda til þess að meta þurfi hvíldartíma sérstaklega fyrir hvert fiskeldissvæði. Ekki er víst að hvíldatími sem tilgreindur er leyfum fiskeldisfyrirtækja dugi til þess að botn nái að ná góðu ástandi eftir eldislotu.
- Athuganir á seti í Ísafjarðardjúpi flokkast sem grunnathugun. Hægt er að nýta gögnin sem hér eru kynnt til þess að meta áhrif eldis á fjarsvæði þess í Ísafjarðardjúpi, verði fiskeldi stundað þar að einhverju marki.
- Ástand sets í Skutulsfirði var verra en í Arnarfirði og í Ísafjarðardjúpi. Sú niðurstaða passar við langvarandi álag frá skólpi, fiskeldi og fiskvinnslu í áranna rás.
- Til stendur að halda þessum rannsóknum áfram, auka við sýnatökustaði (t.d. á Austfjörðum), fjölga sýnum og rannsaka aðra þætti sem tengjast setinu beint og óbeint.
- Með áframhaldandi vöktun og rannsóknum í þessu verkefni mun aukin upplausn verða í gögnum (meiri upplýsingar) sem býður upp á möguleika á að byggja líkan/líkön sem lýsa áhrifum af fiskeldi á botnset meðal annars m.t.t. fjarlægðar frá eldi, dýpis, magn lífmassa í nálægustu kvíum og straumstefnu frá kvíum. Þannig má meta fjaráhrif fiskeldis nákvæmar.

Þakkarorð

Við viljum þakka öllum samstarfsaðilum sem tóku þátt í aðkomu sýnatöku og greiningu sýna. Arnþóri Braga Kristjánssyni og Georg Haney þökkum við fyrir rösk og góð handtök við sýnatöku, myndatökur og undirbúning leiðangra. Einnig Einari Hreinssyni sem aðstoðaði þá fyrrgreindu við að útbúa kjarntaka og myndavélabúnað. Við þökkum Héðni Valdimarssyni, Magnúsi Danielsen og Alice Benoit– Cattin fyrir sitt framlag. Áhöfnin á RS Bjarna Sæmundssyni fá sérstakar þakkir fyrir frábært samstarf. Við viljum einnig þakka Viggó Marteinsyni og Alexöndru Klownoski hjá MATÍS fyrir aðstoð við greiningu á erfðasýnum. Við þökkum einnig Bjarka Elvarssyni og Hrönn Egilsdóttur fyrir yfirlestur þessarar skýrslu. Þorsteinn Músson og Björn Hembre hjá Arnarlax fá þakkir fyrir að veita upplýsingar varðandi starfssemi fyrirtækisins í Arnarfirði.

Heimildir

Aller R.C. (2004). Conceptual models of early diagenetic processes: The muddy seafloor as an unsteady, batch reactor. *Journal of Marine Research*. **62**: 815 – 835.

Ársskýrsla Dýralæknis Fisksjúkdóma 2019. (2020). Matvælastofnun. 51 bls.

Bannister R.J., Valdemarsen T., Hansen P.K., Holmer M. and Ervik A. (2014). Changes in benthic sediment condition under an Atlantic salmon farm at a deep well – flushed coastal site. *Aquaculture Environment Interactions*. **5**: 29 – 47. doi:10.3354/aei00092

Carroll M.L., Cochrane S., Fieler R., Velvin R and White P. (2003). Organic enrichment of sediments from salmon farming in Norway: Environmental factors, management practices, and monitoring techniques. *Aquaculture*. **226**: 165 – 180.

Glud R. (2008). Oxygen dynamics of marine sediments. *Marine Biology Research*. **4**: 243 – 289.

Hafrannsóknastofnun. Áhætta erfðablöndunar – ráðgjöf 2020. Eldi á frjóum Atlantshafslaxi í opnum sjókvíum. 3 bls. https://www.hafogvatn.is/static/extras/images/R%C3%A1%C3%B0gi%C3%B6f_%C3%81h%C3%A6ttumat202011192881.pdf

Heiri O, Lotter A.F. and Lemcke G. (2001). Loss of ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*. **25**: 101 – 110.

Holmer M., Duarte C.M., Heilskov A., Olesen B and Terrados J. (2003). Biogeochemical conditions in sediments enriched by organic matter from net–pen fish farms in the Bolinao area, Philippines. *Marine Pollution Bulletin*. **46**: 1470 – 1479.

International Standard – ISO 12878. First edition 2012–07–01. Environmental monitoring of the impacts from marine finfish farms on soft bottom. 30 bls.

International Standard ISO 19493. First edition 2007– 06– 15. Water quality – Guidance on marine biological surveys of hard – substrate communities. 5 bls.

Jørgensen B.B. (1982). Mineralization of organic matter in the sea bed – the role of sulphate reduction. *Nature*. **296**: 643 – 645.

Jørgensen B.B., Dunker R., Grünke S and Røy H. (2010). Filamentous sulfur bacteria, *Beggiatoa* spp., in arctic marine sediments (Svalbard, 79 °N). FEMS. *Microbiology Ecology*. **73**: 500 – 513. doi:10.1111/j.1574–6941.2010.00918x

Keeley N.G., Macleod C.K., Hopkins G.A and Forrest B.M. (2014). Spatial and temporal dynamics in macrobenthos during recovery from salmon farm induced organic enrichment: When is recovery complete? *Marine Pollution Bulletin*. **80**: 250 – 262.

Matvælastofnun. (2020). Opinber skrá yfir eldisfyrirtæki, skv. 6. Gr. og II viðauka reglugerðar nr. 1254/2008. <https://www.mast.is/static/files/listar/listi-fiskeldisfyrirtaeki-aquaculture-030220-gj.pdf>

Mazzola A., Mirto S., La Rosa T., Fabiano M and Danovaro R. (2000). Fish–farming effects of benthic community structure in costal sediments: analysis of meiofauna recovery. *ICES Journal of Marine Science*. **57**: 1454 – 1461.

Mußmann M., Schulz N.H., Strotmann B et al. (2003). Phylogeny and distribution of nitrate – storing *Beggiatoa* spp. in costal marine sediments. *Environmental Microbiology*. **5**(6): 523 – 533.

Peterson B.J., 1999. Stable isotopes as tracers of organic matter input and transfer in benthic food webs: A review. *Acta Oecologia*. **20** (4), 479 – 487.

Sanz–Lázaro C and Marín A (2008). Assessment of Finfish Aquaculture Impact on the Benthic Communities in the Mediterranean Sea. Dynamic Biochemistry. *Process Biotechnology and Molecular Biology*. Global Science Books. Pages: 21 – 32.

Sará G., Martire M. Lo., Sanfilippo M., Pulicanó G., Cortese G., Mazzola A., Manganaro A., Pusceddu A. (2011). Impacts of marine aquaculture at large spatial scale: Evidences from N and P catchment loading and phytoplankton biomass. *Marine Environmental Research*. **71**: 317 – 324.

Sólveig R. Ólafsdóttir, Héðinn Valdimarsson, Andreas Macrander og Hafsteinn G. Guðfinnsson. (2017 a). *Burðarþol íslenskra fjarða*. HV 2017-033.

Sólveig R. Ólafsdóttir, Alice Benoit-Cattin og Magnús Danielsen. (2017 b). *Endurnýjun næringarefna nærri botni í Arnarfirði og Ísafjarðardjúpi*. HV 2017-035.

Steingrímur Jónsson og Héðinn Valdimarsson. (2015). *Samantekt á mælingum á ástandi sjávar og straumum í Ísafjarðardjúpi*. Hafrannsóknastofnun 12 bls.

Strain P.M and Hargrave B. (2005). Salmon Aquaculture, Nutrient Fluxes and Ecosystem Processes in Southwestern New Brunswick. *Environmental Effects of Marine Finfish Aquaculture*. 5: 29 – 57.

Sintes E., Stoderegger K., Parada V and Herndl G. (2010). Seasonal dynamics of dissolved organic matter and microbial activity in the coastal North Sea. *Aquatic Microbial Ecology*. 60: 85 – 90.

Thorleifur Eiríksson, Leon Moodley, Guðmundur Vidir Helgason, Kristján Lilliendahl, Halldór Pálmar Halldórsson, Shaw Bamber, Gunnar Steinn Jónsson, Jónatan Thórdarson, Thorleifur Ágústsson. (2017). Estimate of organic load from aquaculture – a way to increased sustainability. RORUM 2017 011. ISBN 978-9935-9327-0-9. 21 bls.

Tsutsumi H. (1987). Population dynamics of *Capitella capitata* (Polychaeta; Capitellidae) in an organically polluted cove. *Marine Ecology – Progress Series*. 36: 139 – 149.

Wang X., Olsen L.M., Reitan K.I and Olsen Y. (2012). Discharge of nutrient wastes from salmon farms: environmental effects, and potential for integrated multi-trophic aquaculture. *Aquaculture Environment Interactions*. 2 :267 – 283.

Wei-Jun Cai., Xiping Hu., Wei-Jen Huang., Michael C. Murrell., John C. Lehrter., Steven E. Lohrenz., Wen-Chen Chou., Weidong Zhai., James T. Hollibaugh., Yongchen Wang., Pingsan Zhao., Xianghui Guo., Kjell Gundersen., Minhan Dai and Gwo-Ching Gong. (2011). Acidification of subsurface coastal waters enhanced by eutrophication. *Nature Geoscience*. 4: 766 – 770.

Zaborska A., Włodarska-Kowalczyk M., Legeżyńska J., Jankowska E., Winogradow A and Deja K. (2018). Sedimentary organic matter sources, benthic consumption and burial in west Spitsbergen fjords – Signs of maturing of Arctic fjordic systems? *Journal of Marine Systems*. 180: 112 – 123.

Urban N, Perlinger J.A., Mihelcic J.R. (2008). Oxidation – Reduction. Chapter 3. Chemistry. Environmental Engineering: Fundamentals, Sustainability and Design. Michigan Technological University (http://techalive.mtu.edu/envengtext/ch03_redox.htm)

Vefsíður

Hafrannsóknastofnun (skoðað 13.4.2020). Fjarðarannsóknir. Sótt af: <https://www.hafogvatn.is/is/rannsoknir/fjardarannsoknir/vefstiridir>; <https://www.hafogvatn.is/is/rannsoknir/fjardarannsoknir/vefstiridir/isafjardardjup>; <https://www.hafogvatn.is/is/rannsoknir/fjardarannsoknir/vefstiridir/isafjardardjup/skutulsfjordur>; <https://www.hafogvatn.is/is/rannsoknir/fjardarannsoknir/vefstiridir/dyrafjordur>;

Hagstofa Íslands (skoðað 12.6.2019). Vefur Hagstofu Íslands: Mannfjöldi eftir pósthúsum, kyni og aldri 1998-2019. Sótt af: https://px.hagstofa.is/pxis/pxweb/is/lbuar/lbuar__mannfjoldi__2_byggdir__Byggdakjarnarhverfi/MAN03200.px/table/tableViewLayout1/?rxid=fe9f31f6-b2dc-42dc-a1f6-d719ab25b377

Viðaukar

Viðauki 1. Yfirlit yfir mun á Arnarfirði og Ísafjarðardjúpi. Meiri styrkur/magn er táknað sem ↑ og minni styrkur/magn táknað sem ↓. Táknid ↔ þýðir að enginn munur var á milli fjarðanna. Fram kemur í niðurstöðutexta hvort um tölfræðilega marktækann mun var að ræða milli fjarðanna.

	Breytur	Arnarfjörður	Ísafjarðardjúp
Dýpi	Dýpi á sýnatökustað (m)	↓	↑
Lífrænt efni	Lífrænt efni – sýni frá 2018 (%)	↑	↓
Súrefnisbreytur	Dýpt súrefnislags (O ₂ penetration depth) (mm)	↓	↑
	Sambætt súrefnisnotkun/framleiðsla í seti O ₂ (integrated production/consumption nmol cm ⁻² s ⁻¹)	↔	↔
	Styrkur súrefnis á mörkum sjávar og sets (O ₂ top concentration μmol / L)	↓	↑
	Notkunarhraði súrefnis (O ₂) í seti (cm ⁻³ s ⁻¹)	↑	↓
Afoxunarmætti	Afoxunarmætti á mörkum sjávar og sets (Eh top)	↓	↑
	Afoxunarmætti á 1 cm dýpi sets (Eh 1 cm)	↑	↓
	Afoxunarmætti á 2 cm dýpi sets (Eh 2 cm)	↑	↓
	Afoxunarmætti á 3 cm dýpi sets (Eh 3 cm)	↑	↓
	Afoxunarmætti á 4 cm dýpi sets (Eh 4 cm)	↑	↓
	Afoxunarmætti á 5 cm dýpi sets (Eh 5 cm)	↑	↓
	Hlutfall sýna með mælanleg mörk súrefnis og súrefnisleysis í seti (oxic – anoxic interface)	↓	↑
Sýrustig (pH)	Sýrustig (pH) á mörkum sjávar og sets (pH top)	↓	↑
	Sýrustig (pH) á 1 cm dýpi sets (pH 1 cm)	↑	↓
	Sýrustig (pH) á 2 cm dýpi sets (pH 2 cm)	↑	↓
Brennisteinsvetni	Brennisteinsvetni á 1 cm dýpi sets (H ₂ S 1 cm)	↑	↓
	Brennisteinsvetni á 2 cm dýpi sets (H ₂ S 2 cm)	↑	↓
	Brennisteinsvetni á 3 cm dýpi sets (H ₂ S 3 cm)	↓	↑
	Brennisteinsvetni á 4 cm dýpi sets (H ₂ S 4 cm)	↓	↑

Viðauki 2. Samband (aðhvarfsgreining) milli mats á lífrænu álagi fiskeldis í Arnarfirði og ýmissa efnaferlabreyta. Marktækt meiri styrkur/magn er táknað sem ↑ og marktækt minni styrkur/magn táknað sem ↓. Táknið ↔ þýðir að ekkert samband var milli viðkomandi breytu og mats á lífrænu álagi.

Dæmi um túlkun töflunnar er t.d. að dýpt súrefnislags var marktækt lægra eftir því sem mat á lífrænu álagi var meira.

Breytur	Tengsl við mat á lífrænu álagi
Lífrænt efni – sýni frá 2018 (%)	↔
Dýpt súrefnislags (O ₂ penetration depth) (mm)	↓
Samþætt súrefnisnotkun/framleiðsla í seti O ₂ (integrated production/consumption nmól cm ⁻² s ⁻¹)	↑
Styrkur súrefnis á mörkum sjávar og sets (O ₂ top concentration μmol / L)	↔
Notkunarhraði súrefnis (O ₂) í seti (cm ⁻³ s ⁻¹)	↑
Afoxunarmætti á mörkum sjávar og sets (Eh top)	↔
Afoxunarmætti á 1 cm dýpi sets (Eh 1 cm)	↔
Afoxunarmætti á 2 cm dýpi sets (Eh 2 cm)	↓
Afoxunarmætti á 3 cm dýpi sets (Eh 3 cm)	↔
Afoxunarmætti á 4 cm dýpi sets (Eh 4 cm)	↔
Afoxunarmætti á 5 cm dýpi sets (Eh 5 cm)	↔
Sýrustig (pH) á mörkum sjávar og sets (pH top)	↔
Sýrustig (pH) á 1 cm dýpi sets (pH 1 cm)	↔
Sýrustig (pH) á 2 cm dýpi sets (pH 2 cm)	↔
Brennisteinsvetni á 1 cm dýpi sets (H ₂ S 1 cm)	↔
Brennisteinsvetni á 2 cm dýpi sets (H ₂ S 2 cm)	↔
Brennisteinsvetni á 3 cm dýpi sets (H ₂ S 3 cm)	↔
Brennisteinsvetni á 4 cm dýpi sets (H ₂ S 4 cm)	↔

Viðauki 3. Presence-absence mynd fyrir helstu flokka (class) baktería og fornbaktería sem greindust í 4 sjósýnum af Tjaldanesi. Dökk blár litur táknar að flokkurinn var ekki til staðar (absense) og bleikur táknar að flokkurinn var til staðar. Ljósblárrí litur táknar að viðkomandi flokkur var til staðar en í litlu magni.



Nokkur hugtök

Fjarsvæði: svæði utan vöktunarsvæðis fiskeldisfyrirtækja.

Vöktunarsvæði fiskeldisfyrirtækja: Það svæði sem fiskeldisfyrirtækjum ber að vakta fyrir og eftir framleiðsluferil. Þetta svæði nær 300 - 100 m frá eldiskvíum í straumstefnu. Viðmiðunarsvæði eru ekki tekin með í þessa skilgreiningu enda ekki talin til áhrifasvæða.

Í straumstefnu: stöðin liggur við kvíar þar sem ríkjandi straumar eru líklegir til þess að færa lífrænt efni til hennar.

Djúpstöð: stöðvar sem eru á um 100 m dýpi og botngerðin á sýnatökustað bendir til þess að þar sé líklegt að lífrænt efni geti safnast saman.

Áhrifasvæði: svæði þar sem sýni eru tekin alveg upp við skilgreind kvíassvæði. Þetta eru þó ekki sýnatökusvæði innan vöktunarsvæða eldisfyrirtækjanna sem eru þau svæði sem verða fyrir mestum áhrifum.

Hvílt svæði: svæði þar sem ekki hefur verið virk starfssemi í amk. 1 kynslóð eldis (18 mánuðir).

Þykkt súrefnislags: það hversu langt niður í setið súrefni mælist. Oftast eru þetta örfáir millimetrar í seti fjarða, en getur verið dýpra niður í setið þar sem dýpra er.

Prófill: Mælingar á súrefni, brennisteinsvetni, afoxunarmætti og pH lóðrétt frá yfirborði sets niður á nokkra mm eða cm. Sjá má á prófílum hvernig þessi efni og/eða efnaferlar breytast með dýpt setsins.

Súrefnisupptaka í vatnsfasa (integrated production/consumption): Hversu mikið súrefni er tekið upp pr. flatarmálseiningu sets frá vatnsfasanum. Séu mæld gildi neikvæðar tölur þýðir það súrefnisupptaka en séu þau plústölur bendir það til framleiðni (ljóstillífun). Í seti þar sem nægjanlega djúpt er og þörungar eru ekki að ljóstillífa á yfirborði þess, er líklegra að finna neikvæðar tölur.

Styrkur súrefnis í vatnsfasa: Hversu mikill styrkur súrefnis mælist efst í setinu (top concentration). Hár styrkur er góð vísbinding um að niðurbrot sé ekki mjög mikið meðan lágur styrkur gæti bent til mikils niðurbrots vegna lífræns álags eða niðurbrots á þörungablóma sem fellur til botns. Aðrir þættir geta haft áhrif á þetta eins og t.d. uppblöndun sjávar og árstíðir.

Súrefnisnotkunarhraði setsins (rate): Mat á því hversu mikið súrefni er tekið upp í setinu pr. rúmmálseiningu. Í þessu mati er ekki einungis litið á súrefnisupptöku efst í setinu heldur í öllum lóðréttu prófílum þar sem súrefni er tekið upp í. Sé þetta gildi hátt getur það bent til lífræns álags en einnig niðurbrots þörungablóma sem fallið hefur til botns eða árstíðar. Þetta mat er unnið út frá líkani þar sem hægt er að kljúfa upp mismunandi súrefnisnotkunarhraða m.t.t staðsetningar í seti. Þannig er hægt að sjá hvort niðurbrotið er mest efst í seti eða neðar. Sé niðurbrotið mest efst í setinu er oftast um að ræða niðurbrot á auknu magni lífræns efnis t.d. vegna eldis, skólps eða þörungablóma sem fallinn er til botns



HAFRANNSÓKNASTOFNUN

Rannsókn- og ráðgjafarstofnun hafs og vatna