

HV 2017-033
ISSN 2298-9137



HAF- OG VATNARANNSÓKNIR

MARINE AND FRESHWATER RESEARCH IN ICELAND

Burðarþol íslenskra fjarða



Sólveig R. Ólafsdóttir, Héðinn Valdimarsson, Andreas Macranders og
Hafsteinn G. Guðfinnsson

REYKJAVÍK OKTÓBER 2017

Burðarþol íslenskra fjarða

Sólveig R. Ólafsdóttir, Héðinn Valdimarsson, Andreas Macrander
og Hafsteinn G. Guðfinnsson

Upplýsingablað

Titill: Burðarþol íslenskra fjarða		
Höfundar: Sólveig R. Ólafsdóttir, Héðinn Valdimarsson, Andreas Macrander og Hafsteinn G. Guðfinnsson		
Skýrsla nr: HV 2017-033	Verkefnisstjóri: Sólveig R. Ólafsdóttir	Verknúmer: 9233 (1627)
ISSN 2298-9137	Fjöldi síðna: 17	Útgáfudagur: 16. október 2017
Unnið fyrir: Hafrannsóknastofnun AVS og Próunarsjóður LF styrktu verkefnið	Dreifing: Opið	Yfirfarið af: Hafsteinn G. Guðfinnsson
<p>Ágrip: Verkefnið um burðarþol fjarða sem styrkt var af AVS frá 2014-2016 hafði það markmið að meta burðarþol einstakra fjarða eða svæða þar sem miða ætti við að nýting svæðanna til eldis á fiski sé ábyrg og án þess að hafa óásættanleg áhrif á vistkerfið. Stærsti þáttur verkefnisins var að afla gagna um umhverfið einkum um straumakerfi fjarðanna og vatnsskipti og notkun þeirra upplýsinga, ásamt líkönnum til að meta áhrif lífræns úrgangs frá fiskeldi á umhverfisskilyrði í fjörðunum. Afurðir verkefnisins „Burðarþol íslenskra fjarða“ eru ráðgjöf um burðarþol Dýrafjarðar, Arnarfjarðar, Patreks- og Tálknafjarðar og Ísafjarðardjúps.</p> <p>Abstract: <i>The project on the carrying capacity of fjords that was funded by AVS from 2014-2016 had the objectives of estimating the carrying capacity of areas with the aim that their use for sea pen aquaculture is responsible and without unacceptable influence on the ecosystem. The largest part of the project was research on the environment mainly on the currents and water exchange in the fjords and the use of that knowledge along with models to estimate the effects of the organic waste from fish farming on the environmental conditions in the fjords. The main outcome of the project is advise on the maximum carrying capacity of Dýrafjörður, Arnarfjörður, Patreksfjörður and Tálknafjörður and Ísafjarðardjúp.</i></p>		
Lykilorð: Burðarþol, lífrænt álag, fiskeldi		
Undirskrift verkefnisstjóra:		Undirskrift forstöðumanns sviðs:
		

Efnisyfirlit

Inngangur	1
Aðferðir	2
Niðurstöður.....	3
<i>Dýrafjörður</i>	3
<i>Arnarfjörður</i>	4
<i>Patreks- og Tálknafjörður</i>	7
<i>Ísafjarðardjúp</i>	10
Umræður	14
Þakkir	16
Heimildir	17

Myndaskrá

- 1. mynd.** Straummælalögn ásamt frekari tækjabúnaði. Straummælirinn er um 5 m yfir botni og mælir straum upp til yfirborðsins. Fyrir ofan straummælinn er hita, seltu, þrýstings og súrefnismælir. 2
- 2. mynd.** Niðurstöður mælinga í Dýrafirði þann 10. október 2013. Lóðréttir ferlar. Litlar myndir vinstra megin sýna eðlisþyngd (kg m^{-3}), flúorljómun (ókvarðaða) og mælistöðvar. Stærri myndir sýna hita ($^{\circ}\text{C}$), seltu, súrefnisstyrk (ml l^{-1}) og súrefnismettun (%). 3
- 3. mynd.** Niðurstöður AceXR líkansins fyrir súrefnisstyrk í Dýrafirði. Blá lína sýnir súrefnisstyrk (í ml l^{-1}) í þunnu yfirborðslagi. Grænar línur sýna súrefnisstyrk í meginvatnsbol fjarðarins, þykk græn lína er styrkurinn án eldis. Grænu mjóu línurnar sýna niðurstöður líkansins fyrir áhrif 10, 12 og 14 þúsund tonna eldis í firðinum á súrefnisstyrk í botnlaginu. 4
- 4. mynd.** Staðsetningar mællagna í Arnarfirði frá ágúst 2014 til febrúar 2015 og botndýpi í firðinum. 5
- 5. mynd.** Niðurstöður AceXR líkansins fyrir súrefnisstyrk (ml l^{-1}) í Arnarfirði ásamt niðurstöðum mælinga. Bleiki ferillinn er styrkur súrefnis frá mælingum frá ágúst 2014 til febrúar 2015. Þykku heilu línurnar sýna niðurstöður líkansins án nokkurs eldis í firðinum. Bláu og grænu línurnar sýna ársferil súrefnisstyrksins í efsta laginu og í miðlaginu, rauða þykka línan sýnir niðurstöður líkansins fyrir súrefnisstyrk í botnlaginu. Rauðu mjóu línurnar sýna niðurstöður líkansins fyrir áhrif 10, 20, 30 og 40 þúsund tonna eldis í firðinum á súrefnisstyrk í botnlaginu. 6
- 6. mynd.** Niðurstöður súrefnismælinga (ml l^{-1}) frá 4 stöðum nærri botni í Suðurfjörðum Arnarfjarðar frá ágúst 2014 til febrúar 2015. 7
- 7. mynd.** Niðurstöður mælinga í Patreks- og Tálknafirði þann 3. september 2013. Lóðréttir ferlar. Litlar myndir sýna vinstra megin eðlisþyngd (kg m^{-3}), flúorljómun (ókvarðaða) og mælistöðvar. Stærri myndir sýna hita ($^{\circ}\text{C}$), seltu, súrefnisstyrk (ml l^{-1}) og súrefnismettun (%). 8

- 8. mynd.** Niðurstöður AceXR líkansins fyrir súrefnisstyrk innan þröskulds í Patreks- og Tálknafirði. Þykku heilu línurnar sýna niðurstöður líkansins án eldis í fjörðunum. Bláu og grænu línurnar sýna ársferil súrefnisstyrksins í efsta laginu og í miðlaginu, rauða þykka línan sýnir niðurstöður líkansins fyrir súrefnisstyrk í botnlaginu. Rauða mjóa línan sýnir niðurstöður líkansins fyrir áhrif 20 þúsund tonna eldis í fjörðunum á súrefnisstyrk í botnlaginu. 9
- 9. mynd.** Botndýpi í Ísafjarðardjúpi. Rauðu línurnar tákna ytri mörk þess svæðis sem líkankeyrslur náðu til. Staðsetningar, tákni straumlagna og stefna og styrkur meðalstraums á tveimur dýpum eru einnig sýndar. Mælistöðvar ISNV og ISSA gefa tímaraðir, straums, hita, seltu og súrefni í botnlagi. 10
- 10. mynd.** Niðurstöður mælinga (lóðréttir ferlar) í Ísafjarðardjúpi. Litir sýna tíma mælinga (mánuð ársins). Myndirnar sýna hita ($^{\circ}\text{C}$), seltu, eðlisþyngd (kg m^{-3}) og súrefnisstyrk (ml l^{-1}) og mælistöðvar. 11
- 11. mynd.** Meðalstraumhraði skipt í norður-suður og austur-vestur þætti eftir dýpi á mælistöð norðanmegin og utar í Ísafjarðardjúpi (ISNV lögn) fyrir mælitímann febrúar til nóvember 2016. 12
- 12. mynd.** Meðalstraumhraði skipt í norður-suður og austur-vestur þætti eftir dýpi á mælistöð sunnanmegin og innar í Ísafjarðardjúpi (ISSA lögn) fyrir mælitímann febrúar til nóvember 2016. 12
- 13. mynd.** Hiti ($^{\circ}\text{C}$) á mælistöðvum ISNV (fjólublátt) og ISSA (ljósblátt) febrúar til nóvember, ásamt yfirborðshita í Æðey (blátt) á árinu 2016. 13
- 14. mynd.** Súrefni (ml l^{-1}) á mælistöðvum ISNV (fjólublátt) og ISSA (ljósblátt), febrúar til nóvember 2016. 13
- 15. mynd.** Selta á mælistöðvum ISNV (fjólublátt) og ISSA (ljósblátt), febrúar til nóvember 2016. 14

Inngangur

Við breytingu á lögum um fiskeldi árið 2014 voru sett inn ný ákvæði um að rekstrarleyfi skuli fylgja burðarþolsmat sem framkvæmt sé af Hafrannsóknastofnun. Í lögum er mat á burðarþoli svæða skilgreint sem þol þeirra til að taka við auknu lífrænu álagi án þess að það hafi óæskileg áhrif á lífríkið þannig að viðkomandi vatnshlot uppfylli umhverfismarkmið sem sett eru samkvæmt lögum nr. 36/2011 um stjórn vatnamála. Hlutverk burðarþolsmats er að meta óæskileg staðbundin áhrif af eldisstarfsemi, en lýtur ekki að öðru álagi á umhverfið.

Árin 2014-2016 fékk Hafrannsóknastofnun styrk frá AVS Rannsóknasjóði til að hefja umhverfisrannsóknir á þeim svæðum þar sem fiskeldi er heimilað og gera í framhaldinu mat á burðarþoli þeirra m.t.t. fiskeldis. Eftir að styrktartíma AVS sjóðsins lyki var gert var ráð fyrir að Umhverfissjóður sjókvíaeldis sem þá var nýstofnaður myndi sjá um fjármögnun verkefnisins. Meðumsækjendur voru Landsamband Fiskeldisstöðva og Umhverfisstofnun.

Stærsti þáttur verkefnisins var að afla gagna um umhverfið einkum um straumakerfi fjarðanna og vatnsskipti en einnig að nota þær upplýsingar ásamt líkönum til að meta áhrif lífræns úrgangs frá fiskeldi á umhverfisskilyrði í fjörðunum. Talið er að óvissa um straumkerfi fjarða sé einn stærsti óvissuþátturinn við mat á burðarþoli fjarða m.t.t. fiskeldis. Við mat á umhverfisáhrifum framkvæmda inni á fjörðum víða í kringum land hefur sífellt komið betur og betur í ljós að verulega skortir þekkingu á botngerð, botnlögun, straumum, sjófræði og lífríki íslenskra fjarða til að hægt sé að meta væntanleg áhrif framkvæmda eða fiskeldis á lífríki fjarðanna. Grunnrannsóknir, svo sem rannsóknir á á straumum, hita, seltu, næringarefnum, súrefni, svifþörungum, dýrasvífi, botndýrum, fiskeggjum og fisklirfum, skortir víða.

Með því að nota líkön ásamt rannsóknaniðurstöðum frá tilteknu sjókvíaeldissvæði er hægt að meta burðarþol m.t.t. eldis fyrir afmörkuð svæði. Reiknilíkönin þurfa að ná að líkja vel eftir hafeðlisfræðilegum, hafefnafræðilegum og vistfræðilegum ferlum í umhverfinu, sem og eftir súrefnisnotkun og uppsprettum og afdrifum lífræns efnis og næringarefna sem stafa frá eldinu. Vöktun á raunverulegum áhrifum eldisins er svo afar nauðsynleg til að sýna fram á hver áhrif eldisins eru.

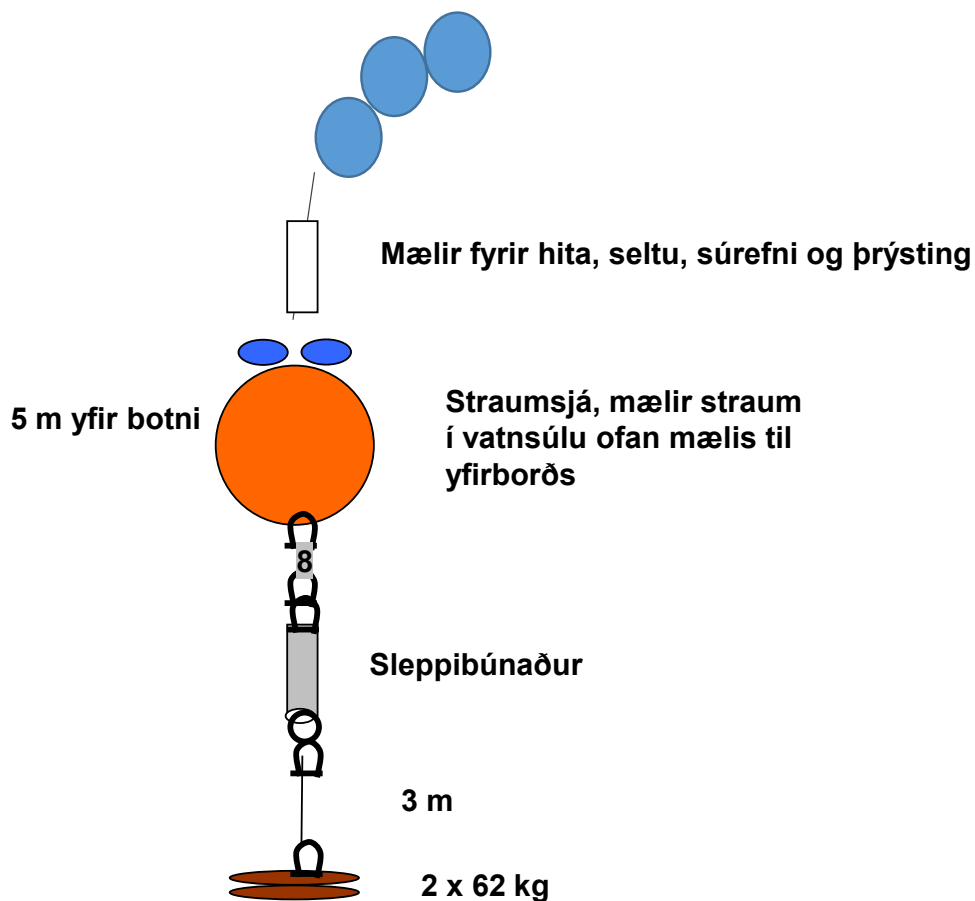
Til eru ýmis líkön sem hönnuð hafa verið sérstaklega fyrir fiskeldi (sjá t.d. Reid o.fl., 2009). Almennt hafa þessi líkön verið hönnuð annað hvort til að athuga áhrifin á svæði nærri kvíunum eða áhrifin á stærra svæði umhverfis kvíar svo sem í heilum firði. Hins vegar eru flest þau líkön sem til eru í dag enn rannsóknatæki (Symonds, 2011) en eru ekki notuð við ákvarðanatöku.

Oftast hefur burðarþol verið metið með því að skoða áhrifin á súrefnisstyrk nærri botni, fjölbreytileika og magn botndýra, ofauðgun næringarefna og svifþörungablóma og afoxunarmætti (redox potential) í seti (Giles, 2008). Alla þessa þætti þarf að skoða við mat á áhrifum fiskeldis á umhverfið. Margir aðrir líffræðilegir, vistfræðilegir og hagrænir þættir geta líka legið til grundvallar burðarþoli varðandi fiskeldið, t.d. skólþrosun, smithætta, erfðablöndun við villta stofna, nytjastofnar og veiðihagsmunir.

Í þessari skýrslu er farið yfir helstu niðurstöður verkefnisins en ráðgjöf Hafrannsóknastofnunar um burðarþol Dýrafjarðar, Arnarfjarðar, Patreks- og Tálknafjarðar og Ísafjarðardjúps eru helsta afurðir verkefnisins.

Aðferðir

ADCP straumsjár (Teledyne) voru notaðar til að afla grundvallarþekkingar um streymi sjávar í fjörðunum. Þeim var komið fyrir á lögnum um 5 metra yfir botni ásamt CTD tæki (conductivity, temperature, depth) með súrefnisnema (Seabird). Mynd 1 sýnir dæmigerða straumlögn. Markmiðið var að ná samfelldri mælingu í um 6 mánuði í hverjum firði og kortleggja streymið í firðinum. Æskilegt er að hafa 4 lagnir samtímis í hverjum firði. Mikilvægt er að mæla frá sumri og fram eftir vetri til að sjá árlegt lágmark í súrfnisstyrk. Samhliða þessum mælingum var einnig aflað gagna um hita, seltu, súrefni og styrk uppleystra næringarefna á völdum stöðvum í fjörðunum og til þess var einnig notað CTD tæki frá SeaBird. Næringarefni voru mæld á Hafrannsóknastofnun með ljósgleypni-aðferðum (Sólveig R. Ólafsdóttir, 2011). Í Arnar-, Patreks- og Tálknafirði var ákoma lífræns efnis á botninn rannsökuð en til þess var komið fyrir setgildrum (frá KC Denmark) á 10 stöðum í fjörðunum. Aðferðirnar og niðurstöðurnar úr þeirri rannsókn hafa þegar verið birtar (Sólveig R. Ólafsdóttir o.fl., 2015).



1. mynd. Straummælalögn ásamt frekari tækjabúnaði. Straummælirinn er um 5 m yfir botni og mælir straum upp til yfirborðsins. Fyrir ofan straummælinn er hita-, seltu-, þrýstings- og súrefnismælir.

Figure 1. Mooring with ADCP current meter and other instruments. The current meter is about 5 m above the bottom and measures current to the surface. Above the current meter is a CTD and an oxygen sensor.

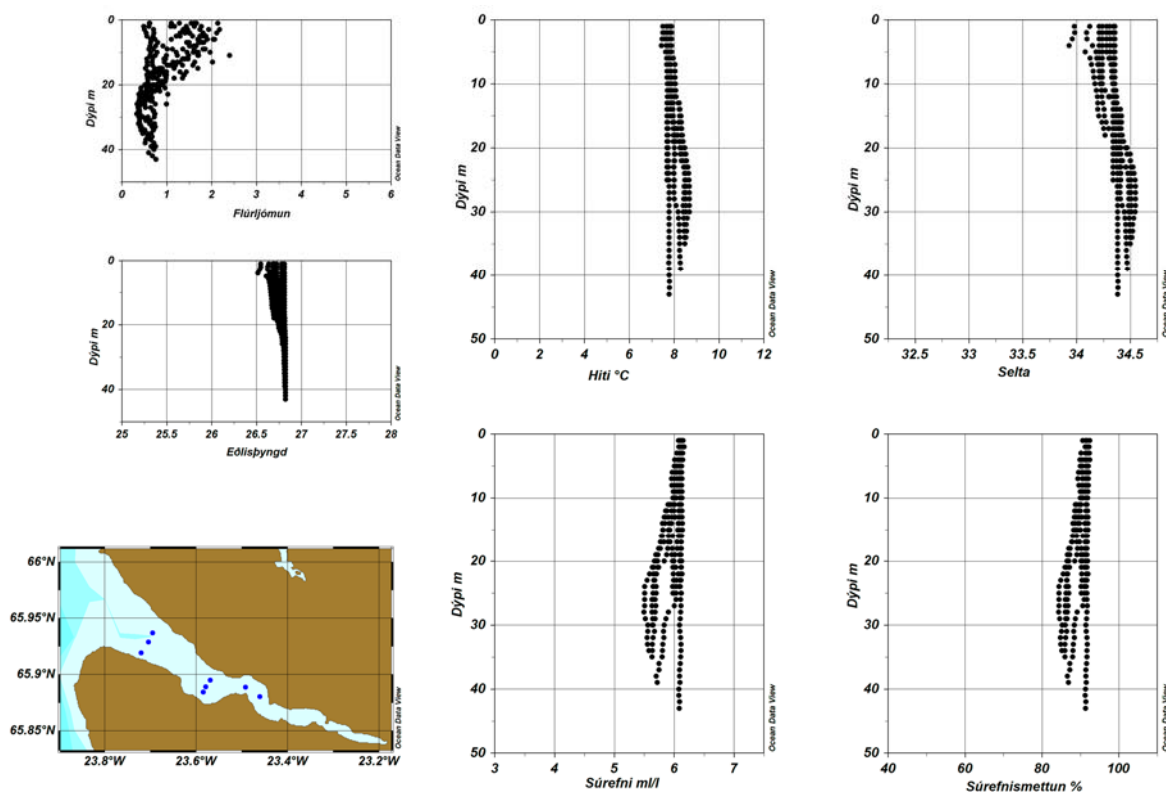
Við þetta er mest notast við líkönin AceXR (Tett o.fl., 2011, Portilla o.fl., 2009) og Ancylus-FjordEnv (Stigebrandt o.fl., 2004, Stigebrandt, 2011), en þau líkön byggja að mestu á sömu nálgun. Mikil vinna hefur verið lögð í að staðfæra AceXR líkanið fyrir þau svæði sem til rannsóknar eru hverju sinni með því að nota raungögn. Við staðfæringu og keyrslur hefur verið notast við þau gögn sem fengist hafa á síðustu misserum. Ýmsar myndir voru gerðar í forritinu Ocean Data View (Schlitzer, R, 2017).

Niðurstöður

Mikill efniviður um strauma og vatnsskipti í fjörðunum er nú til og bíður birtingar á öðrum vettvangi. Hér á eftir er samantekt helstu niðurstaðna fyrir firðina fyrir vestan ásamt því mati á burðarþoli sem gert hefur verið á grundvelli þeirra.

Dýrafjörður

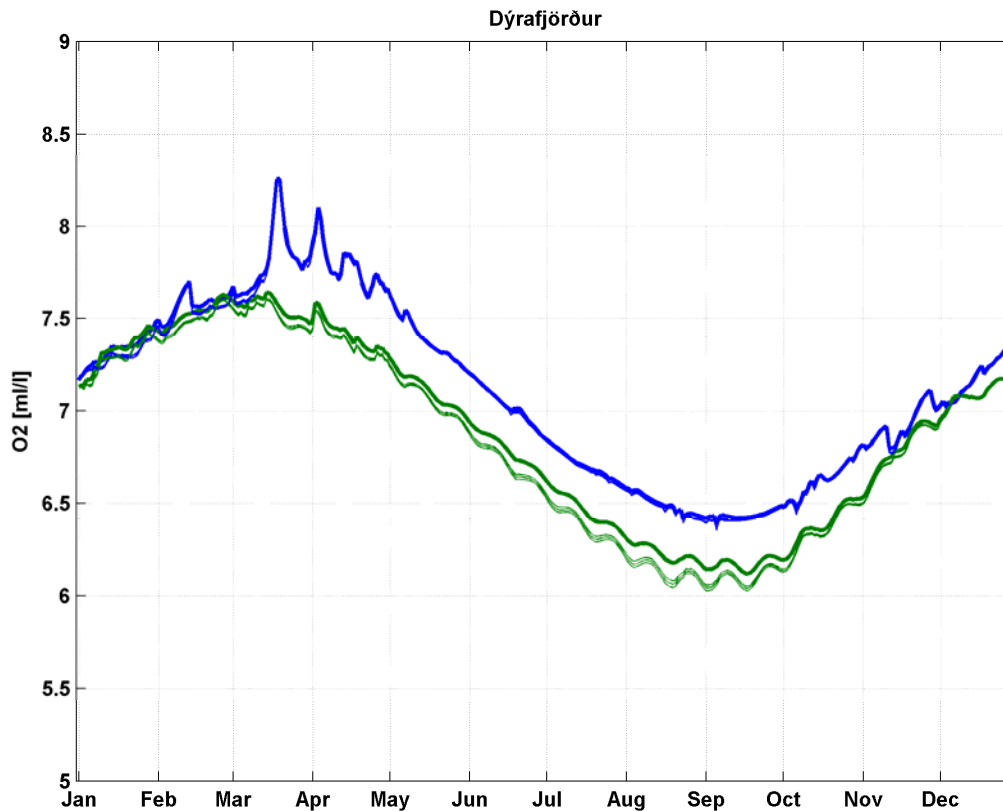
Dýrafjörður er tiltölulega grunnur og opinn fjörður. Allnokkrar grynningar eru fyrir utan fjarðarmynnið þannig að um eiginlegan þröskuld er vart að ræða. Endurteknar mælingar með hita-, seltu- og súrefnisrita (2. mynd) hafa sýnt að sjórinn í firðinum er oftast vel uppblandaður og eiginlegt botnlag er ekki til staðar. Á árinu 2014 var lagt straumlögnum með síritum á fimm stöðum í firðinum. Mælt var samfellt frá apríl fram í september. Síritarnir mældu hita-, seltu- og súrefni auk dýpis.



2. mynd. Niðurstöður mælinga í Dýrafirði þann 10. október 2013. Lóðréttir ferlar. Litlar myndir vinstra megin sýna eðlisþyngd (kg m^{-3}), flúorljómun (ókvarðaða) og mælistöðvar. Stærri myndir sýna hita ($^{\circ}\text{C}$), seltu, súrefnisstyrk (ml l^{-1}) og súrefnismettun (%).

Figure 2. Results from measurements in Dýrafjörður on the 10th of October 2013. Vertical profiles. The small panels on the left show density (kg m^{-3}), fluoresence (not calibrated) and the stations positions. The larger panels show temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity, oxygen concentration (ml l^{-1}) and oxygen saturation (%).

Þessar mælingar staðfestu að fjörðurinn er vel blandaður jafnvel yfir sumartímann þegar líklegast er að lagskipting sé til staðar. Innan við tíu metra djúpt yfirborðslag hefur þó verið merkjanlegt síðla sumars vegna ferskvatnsrennslis af landi. Súrefnisinnihald er að jafnaði hátt á haustmánuðum líkt og á öðrum árstímum. Straummælingar líkt og líkanakeyrsalur sýna að endurnýjunartími sjávar í Dýrafirði er stuttur eða nálægt því ein vika.



3. mynd. Niðurstöður AceXR líkansins fyrir súrefnisstyrk í Dýrafirði. Blá lína sýnir súrefnisstyrk (í ml l⁻¹) í þunnu yfirborðslagi. Grænar línur sýna súrefnisstyrk í meginvatnsbol fjarðarins, þykk græn lína er styrkurinn án eldis. Grænu mjóu línurnar sýna niðurstöður líkansins fyrir áhrif 10, 12 og 14 þúsund tonna eldis í firðinum á súrefnisstyrk í botnlaginu.

Figure 3. Results from the AceXR model for oxygen concentration in Dýrafjörður. The blue line shows oxygen concentration (in ml l⁻¹) in a thin surface layer. The green lines show oxygen concentration in the main layer in the fjord, the heavy green line represents the concentration without any aquaculture. The thin green lines represent the model results for the effects of 10, 12 and 14 thousand tonne aquaculture on the oxygen concentration in the bottom layer.

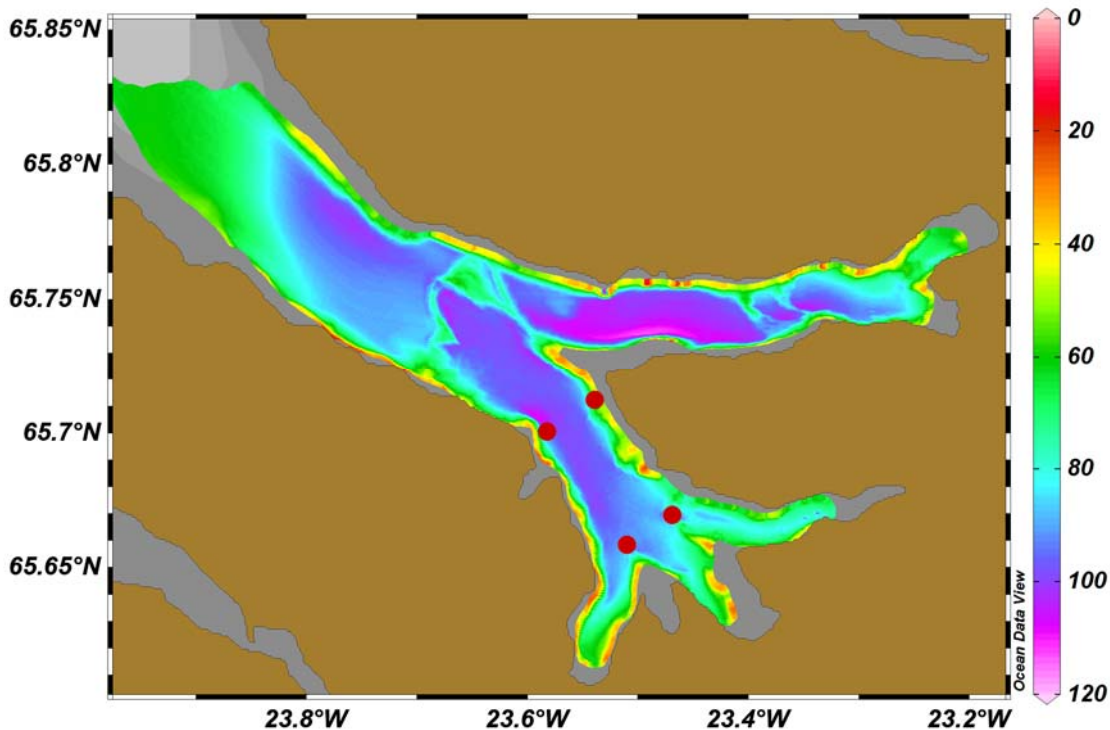
Í Dýrafirði voru niðurstöður líkanareikninga að fjörðurinn væri lítt viðkvæmur fyrir lífrænu álagi hvað varðar súrefnisbúskap hans (3. mynd). Það er einnig í samræmi við niðurstöður mælinga á súrefni.

Með tilliti til stærðar fjarðarins og varúðarnálgunar varðandi raunveruleg áhrif eldisins á einkum botndýralíf var ráðlagt með þessu mati á burðarþoli að hægt sé að leyfa allt að 10 þúsund tonna eldi í í Dýrafirði á ári.

Arnarfjörður

Hafrannsóknastofnun hefur á undanförunum árum gert margvíslegar athuganir á ástandi sjávar og hafstraumum í Arnarfirði til að undirbyggja mat á burðarþoli hans. Gerðar voru mælingar með 4 straumslám og siritum fyrir hita, seltu og súrefni í Suðurfjörðum

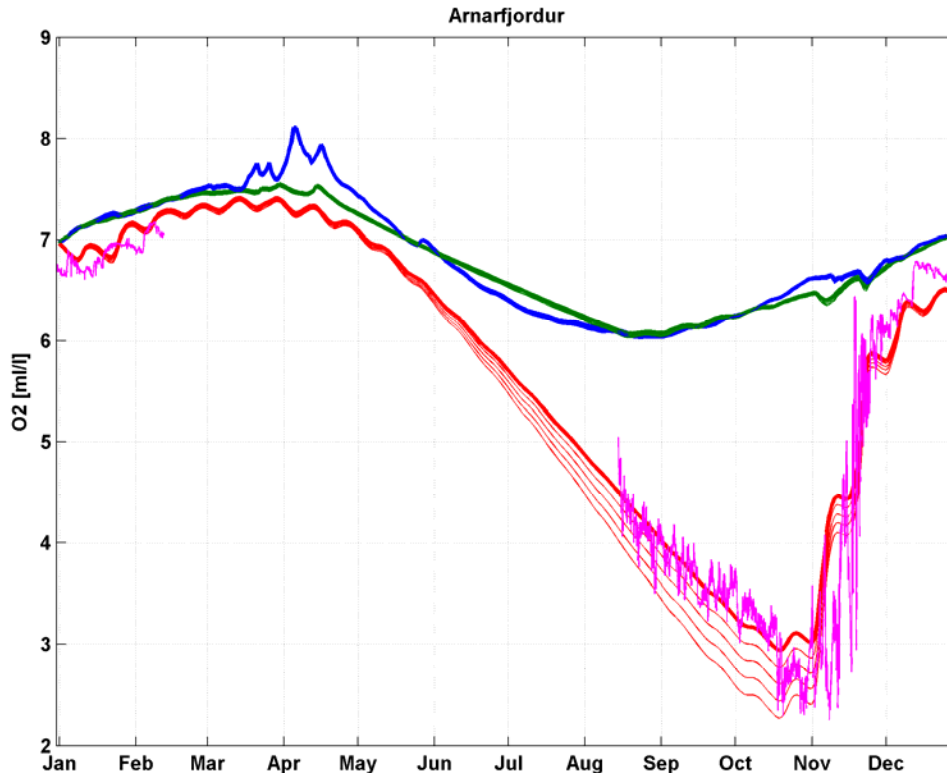
Arnarfjarðar í ágúst 2014 til febrúar 2015 (4. mynd). Einnig var mælt í ytri hluta fjarðarins síðar á árinu 2015. Þá hefur Hafrannsóknastofnun aðgang að gögnum úr ýmsum rannsóknum í firðinum sem fiskeldisfyrirtækin sem þar starfa hafa látið framkvæma. Öll þessi gögn voru notuð til stuðnings því bráðabirgðamati á burðarþoli fjarðarins sem gert var árið 2015.



4. mynd. Staðsetningar mællagna í Arnarfirði frá ágúst 2014 til febrúar 2015 og botndýpi í firðinum.

Figure 4. Positions of moorings in Arnarfjörður from August 2014 to February 2015 and bottom depth in the fjord.

Botnlögun Arnarfjarðar einkennist af grynningum eða svonefndum þröskuldi fyrir mynni fjarðarins. Þetta hefur áhrif á streymi sjávar inn og út úr firðinum svo og dýptardreifingu sjógerða í honum þegar lagskipting er fyrir hendi, en þá er hita- og seltustigull meiri á skilum milli sjávarlaga. Lagskipting stendur að jafnaði frá vori og fram á haust og á þeim tíma má lýsa henni með yfirborðslagi 15-20 m djúpu. Þetta lag er ferskara og heitara en miðlagið sem er um það bil á 20 m til 60m dýpis. Neðan þess dýpis er botnlag frá 60 m niður undir botn. Hringrás meðalstraumsins er almennt þannig að sjór berst inn í fjörðinn sunnantil og út úr honum norðanvert. Hringrás þessi verður þó flóknari í innfjörðum fjarðarins. Ljóst er að straumur í botnlaginu er minni en í miðlaginu á meðan lagskipting stendur. Þessi þrjú lög eru sambærileg því sem þekkt er í þröskuldsfjörðum almennt. Í tilfalli þröskuldsfjarða er megin áhyggjuefnið að jafnaði endurnýjun sjávar og þar með súrefnis í botnlaginu. Þær athuganir sem gerðar hafa verið sýna að þetta er raunin í því sem næst öllum Arnarfirði, hvort sem er ytri eða innri hluta hans.

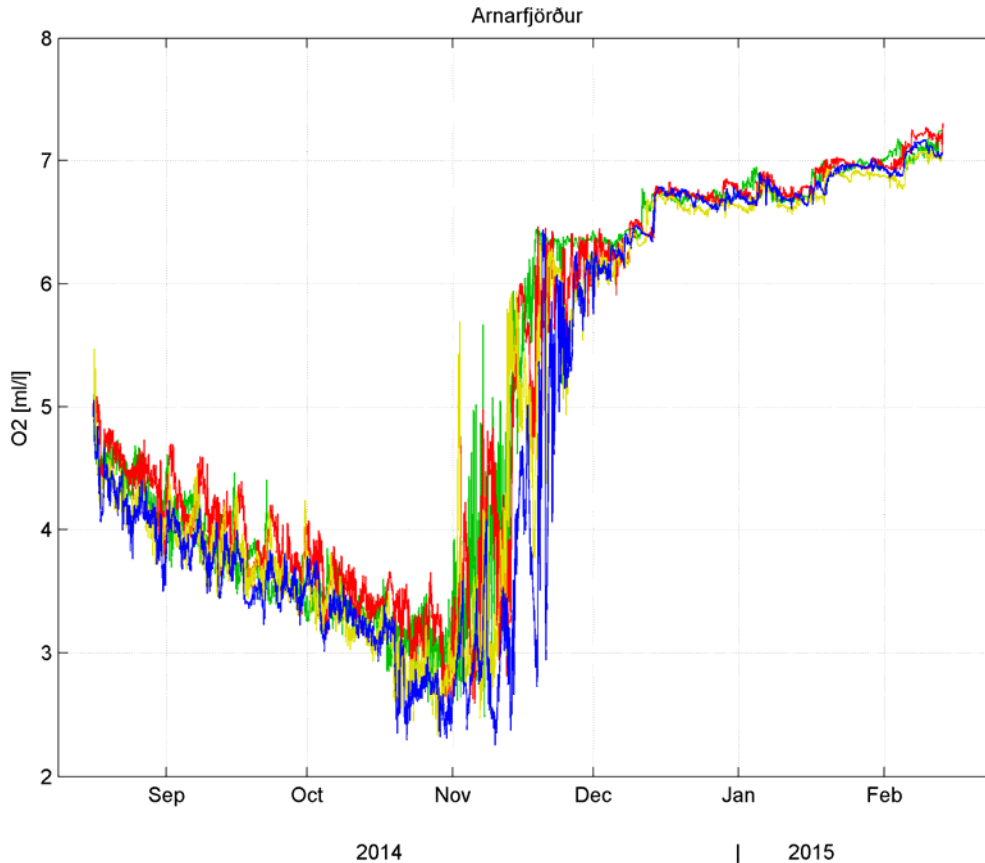


5. mynd. Niðurstöður AceXR líkansins fyrir súrefnisstyrk (ml l^{-1}) í Arnarfirði ásamt niðurstöðum mælinga. Bleiki ferillinn er styrkur súrefnis í mælingum frá ágúst 2014 til febrúar 2015. Þykku heilu línurnar sýna niðurstöður líkansins án nokkurs eldis í firðinum. Bláu og grænu línurnar sýna ársferil súrefnisstyrksins í efsta laginu og í miðlaginu, rauða þykka línan sýnir niðurstöður líkansins fyrir súrefnisstyrk í botnlaginu. Rauðu mjóu línurnar sýna niðurstöður líkansins fyrir áhrif 10, 20, 30 og 40 þúsund tonna eldis í firðinum á súrefnisstyrk í botnlaginu.

Figure 5. Results from the AceXR model for oxygen concentration (ml l^{-1}) in Arnarfjörður and results from observations. The observed concentration of oxygen (ml l^{-1}) from August 2014 to February 2015 is shown in pink. The solid, thick lines show the results from the model without any aquaculture in the fjord. The blue and green lines show the annual cycle of oxygen concentration in the surface and middle layers, the red, heavy line shows the model results for the oxygen concentration in the bottom layer. The red, thin lines represent the model results for the effects of 10, 20, 30 and 40 thousand tonne aquaculture on the oxygen concentration in the bottom layer.

Niðurstöður líkansins fyrir súrefnisstyrk í efsta lagi, miðlagi og botnlagi fjarðarins, ásamt mælingum á súrefnisstyrk og útreiknuðum áhrifum frá 10, 20, 30 og 40 þúsund tonna eldi á súrefnisstyrkinn í botnlaginu eru sýndar á 5. mynd. Líkanið nær að líkja þökkalega vel eftir mældum súrefnisgildum í botnlaginu.

Niðurstöður samfelldra mælinga frá árinu 2014 sýna að súrefnisstyrkur í botnlagi í Suðurfjörðum Arnarfjarðar lækkar jafnt og þétt eftir því sem líður á haustið (5. mynd) á öllum mælistöðvum. Síðla hausts verður svo endurnýjun sjávar í botnlaginu og er hún drifin af blöndun innan og utan fjarðarins. Ljóst er að þetta ferli á sér stað á hverju hausti en hvenær endurnýjunin verður er breytilegt milli ára. Náttúruleg súrefnisnotkun í botnlaginu var um $0,8 \text{ ml l}^{-1} \text{ mán}^{-1}$ frá því er mælingar hófust um miðjan ágúst og þar til endurnýjun varð á botnsjónum um miðjan nóvember. Þar sem að súrefnisstyrkur var orðinn minni en 3 ml l^{-1} skömmu áður en endurnýjun varð er ljóst að lægsti súrefnisstyrkur mun hafa afgerandi áhrif á ákvörðun um burðarþol í framtíðinni. Rannsóknir frá Noregi benda til að



6. mynd. Niðurstöður súrefnismælinga (ml l^{-1}) frá 4 stöðum nærri botni í Suðurfjörðum Arnarfjarðar frá ágúst 2014 til febrúar 2015.

Figure 6. Results from oxygen measurements (ml l^{-1}) from 4 locations close to the bottom in the southern fjords in Arnarfjörður from August 2014 to February 2015.

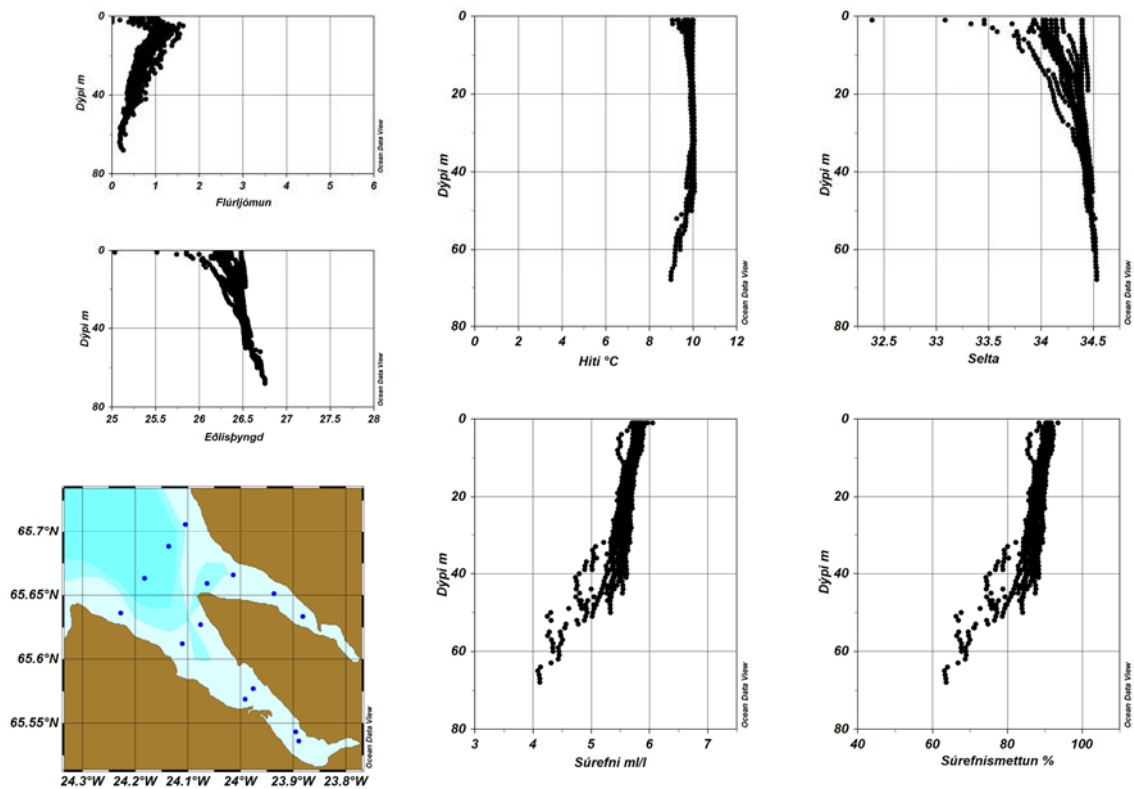
við súrefnisstyrk minni en $3\text{-}3,5 \text{ ml l}^{-1}$ fari tegundafjölbreytileiki botndýra minnkandi (Buhl-Mortensen o.fl., 2006).

Við líkankeysrslur í Arnarfirði var talið líklegast að verstu aðstæður gætu orðið þegar allur úrgangur frá eldinu lenti í botnlagi sjávar, blöndun yrði seint um haust, og að blöndun milli botnlagsins og miðlagsins væri fremur lítil. Við þær aðstæður er lækkunin á súrefnisstyrk í botnlaginu metin sem $0,6 \text{ ml l}^{-1}$ sé 20 þúsund tonna eldi í firðinum. Styrkurinn gæti þá farið niður fyrir $2,5 \text{ ml l}^{-1}$ um stuttan tíma (2-4 vikur) að hausti. Í burðarþolsmati fyrir Arnarfjörð var gert ráð fyrir að um helmingur úrgangsins lenti í botnlaginu. Áhrif af 20 þúsund tonna eldi gætu þannig orðið lækkun á súrefnisstyrk um $0,3 \text{ ml l}^{-1}$ í botnlaginu. Jafnframt var gert ráð fyrir að hámarkslífmassi í 20 þúsund tonna eldi fari ekki yfir þau mörk á neinum tíma í eldisferlinu sér í lagi þegar súrefnisstyrkur er lægstur.

Patreks- og Tálknafjörður

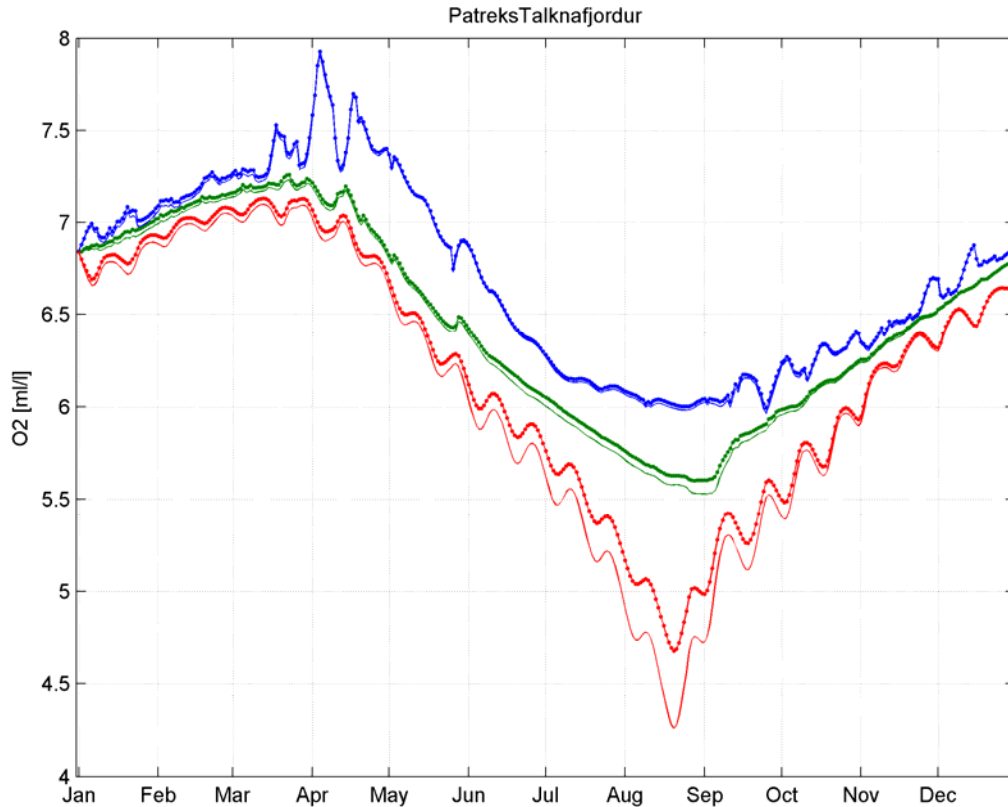
Patreks- og Tálknafjörður, ásamt Patreksfjarðarflóa voru hér skoðaðir sem eitt fjarðakerfi. Í flóanum er þröskuldur og er mesta dýpi fyrir innan hann 20-30 metrum dýpra en þröskuldsdýpið. Gert er ráð fyrir að fjarðakerfið hafi 3 sjávarlög þar sem botnlag sé fyrir neðan þröskuldsdýpi en þar fyrir ofan miðlag og yfirborðslag. Svæðið innst í Tálknafirði, Hópið, er ekki tekið með í þessum útreikningum og því ekki gert ráð fyrir eldi þar.

Endurteknar mælingar með hita-, seltu- og súrefnisrita hafa sýnt að sjór í firðinum er oftast vel uppblandaður en eiginlegt botnlag er þó greinilegt síðla sumars og fram á haust (Héðinn Valdimarsson og Magnús Danielsen, 2014). Á árinu 2008-2009 voru gerðar rannsóknir á sjófræði fjarðanna sem og straummælingar með siritandi mælum eru til frá síðustu árum. Þá voru einnig gerðar mælingar á sjófræði og uppleystu súrefni í fjörðunum haustið 2013 (7. mynd).



7. mynd. Niðurstöður mælinga í Patreks- og Tálknafirði þann 3. september 2013. Lóðréttir ferlar. Litlar myndir vinstra megin sýna eðlisþyngd (kg m^{-3}), flúorljómun (ókværðaða) og mælistöðvar. Stærri myndir hita ($^{\circ}\text{C}$), seltu, súrefnisstyrk (ml l^{-1}) og súrefnismettun (%).

Figure 7. Results from measurements in Patreksfjörður and Tálknafjörður on the 3rd of September 2013. Vertical profiles. The small panels on the left show density (kg m^{-3}), fluorescence (not calibrated) and the stations positions. The larger panels show temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity, oxygen concentration (ml l^{-1}) and oxygen saturation (%).



8. mynd. Niðurstöður AceXR líkansins fyrir súrefnisstyrk innan þröskulds í Patreks- og Tálknafirði. Þykku heilu línurnar sýna niðurstöður líkansins án eldis í fjörðunum. Bláu og grænu línurnar sýna ársferil súrefnisstyrksins í efsta laginu og í miðlaginu, rauða þykka línan sýnir niðurstöður líkansins fyrir súrefnisstyrk í botnlaginu. Rauða mjóa línan sýnir niðurstöður líkansins fyrir áhrif 20 þúsund tonna eldis í fjörðunum á súrefnisstyrk í botnlaginu.

Figure 8. Results from the AceXR model for oxygen concentration (ml l^{-1}) within the threshold in Patreksfjörður and Tálknafjörður. The solid, thick lines show the results from the model without any aquaculture in the fjords. The blue and green lines show the annual cycle of oxygen concentration in the surface and middle layers, the red, heavy line shows the model results for the oxygen concentration in the bottom layer. The red, thin line represent the model results for the effects of 20 thousand tonne aquaculture on the oxygen concentration in the bottom layer.

Þessar mælingar hafa staðfest að fjörðurinn er að jafnaði vel blandaður en að yfir sumartímann verður lagskipting niðri við botn annars vegar og í yfirborði hins vegar. Súrefnisinnihald er að jafnaði hátt en lágmark í styrk súrefnis mælist í mesta dýpi fjarðanna á haustmánuðum.

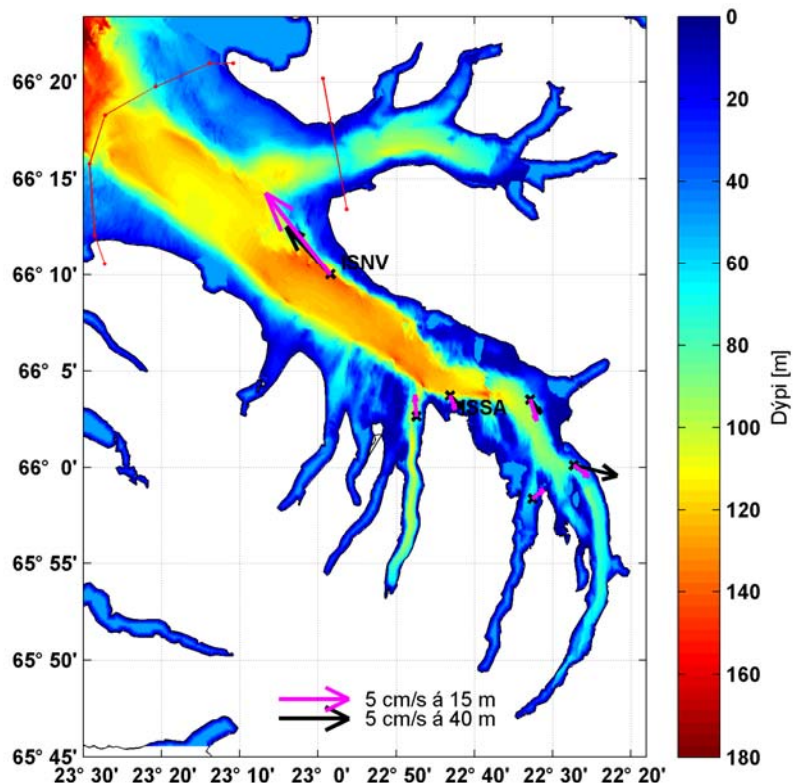
Niðurstöður burðarþóslíkansins eru að lækkunin á súrefnisstyrknum í botnlaginu er metin sem $0,4 \text{ ml l}^{-1}$ fyrir 20 þúsund tonna eldi í firðinum þegar áhrif þess eru mest (8. mynd). Gert er ráð fyrir að hámarkslífsmassi við 20 þúsund tonna eldi fari ekki yfir þau mörk á neinum tíma í eldisferlinu sér í lagi þegar súrefnisstyrkur er lægstur.

Með tilliti til stærðar fjarðanna og varúðarnálgunar varðandi raunveruleg áhrif eldisins einkum á botndýralíf og súrefnisstyrk var ráðlagt með þessu mati á burðarþóli að hægt sé að leyfa allt að 20 þúsund tonna eldi í Patreks- og Tálknafirði á ári.

Ísafjarðardjúp

Í Ísafjarðardjúpi er mesta dýpi 162 metrar og í mynni þess er þröskuldur með 118 m dýpi (9. mynd). Vatnsskipti við fjörðinn eru nokkuð greið og benda sjórannsóknagögn til þess að nokkuð góð tenging sé milli djúplags í Ísafjarðardjúpi og dýpri sjávarlaga úti í Djúpál, sem hjálpar til við endurnýjun botnsjávar í Ísafjarðardjúpi.

Töluvert er til af gögnum um ástand sjávar í Ísafjarðardjúpi frá fyrri árum (Steingrímur Jónsson o.fl. 2011 og Héðinn Valdimarsson o.fl. 2014). Hér hefur þó mest verið stuðst við gögn sem aflað hefur verið undanfarin ár, s.s. straummælingar í innfjörðum sem sjá má á 9. mynd. Á tveimur mælistöðvum var lögnum með straumsjám og síritum til mælinga á hita, seltu og súrefni komið fyrir annars vegar við norðanvert og utanvert Djúp gengt Skutulsfirði (ISNV) og hins vegar norður af Ögri við sunnanvert og innanvert Djúp (ISSA).



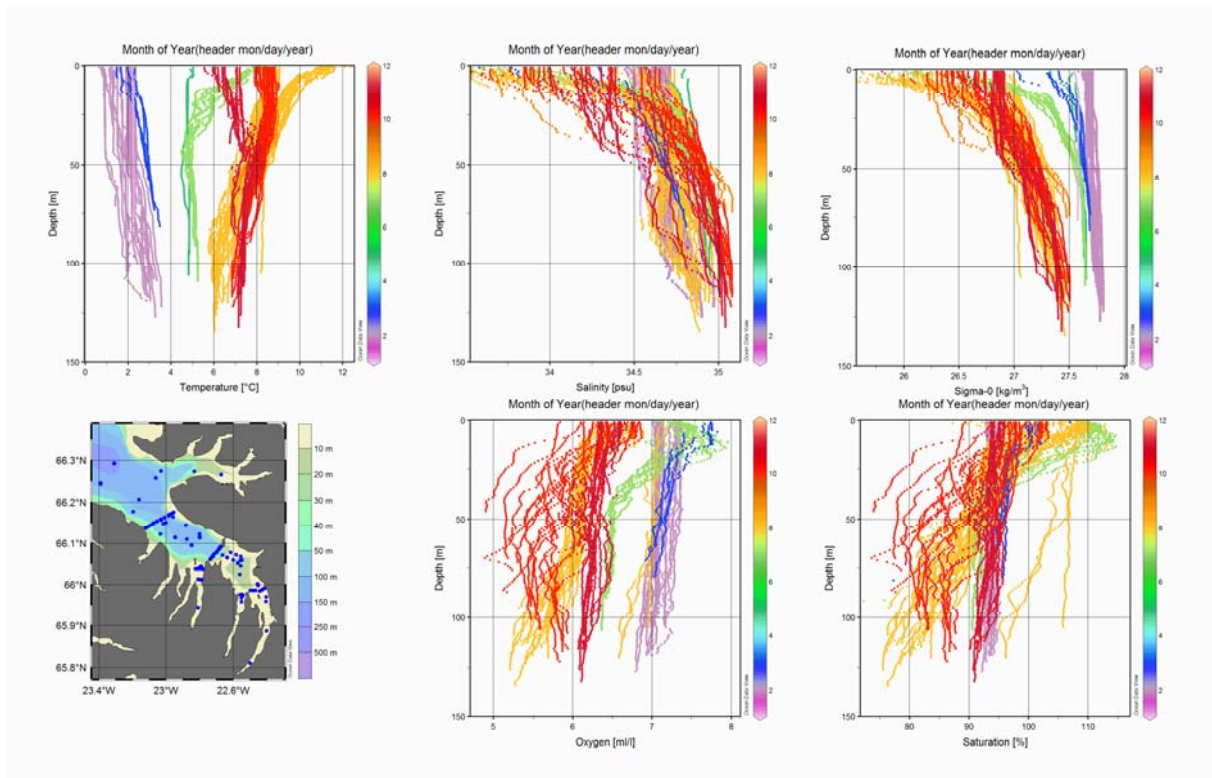
9. mynd. Botndýpi í Ísafjarðardjúpi. Rauðu línurnar tákna ytri mörk þess svæðis sem líkankeyrslur náðu til. Staðsetningar, tákn straumlagna og stefna og styrkur meðalstraums á tveimur dýpum eru einnig sýndar. Mælistöðvar ISNV og ISSA gefa tímaraðir, straums, hita, seltu og súrefnis í botnlagi.

Figure 9. The topography of Ísafjarðardjúp. The red lines indicate the boundaries of the area included in the model runs. The positions, mooring annotations and the direction and strength of the average current for two depths is also shown. The stations ISNV and ISSA have time series of current, temperature, salinity and oxygen in the bottom layer.

Athuganir á ástandi sjávar á ýmsum árstímum í firðinum (10. mynd) sýna að líkt og víðast í sjó við landið er vatnssúlan í Ísafjarðardjúpi nær öll uppblönduð að vetrarlagi (febrúar). Að vori og sumri myndast heitara og ferskara grunnt yfirborðslag í efstu 20-30 metrum sjávarins, sem síðan blandast neðri lögum að nýju þegar kólnar og vindar blása að hausti. Neðan þessa lags, er miðlag þar sem stigull hita og seltu er mun minni en í yfirborðslagi og liggur það yfir botnlagi sem einkennist m.a. af lægri súrefnigildum. Svæði innan Æðeyjar og innfirðir Djúpsins eru margir hverjir með þrengingum við mynni og meðalstraumur í þeim er veikari en úti í Djúpi.

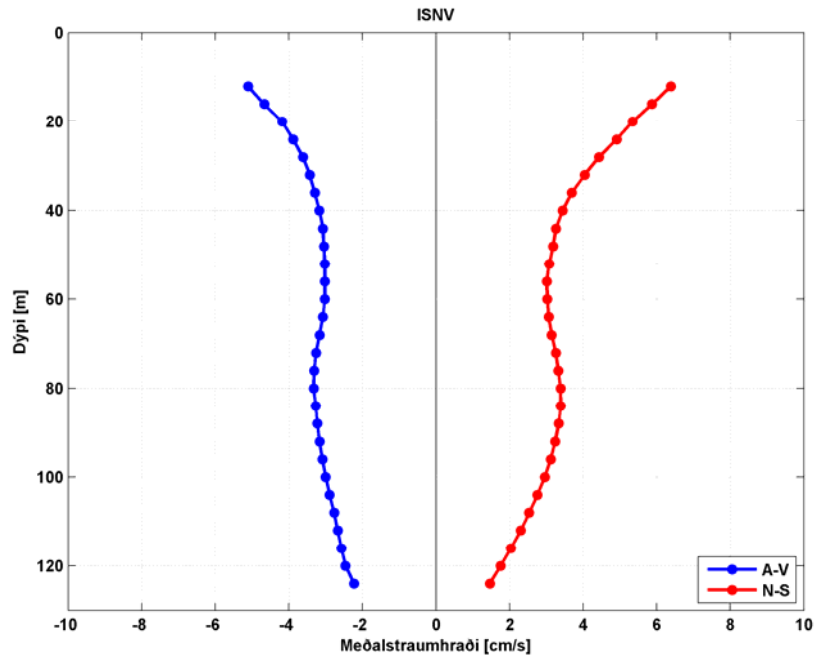
Þessi lóðrétt dreifing eðlisþátta styður notkun á þriggja laga líkani til þess að meta þróun þeirra í Ísafjarðardjúpi og þá er áherslan einkum á ytri og dýpsta hluta Ísafjarðardjúps. En innfirðir og svæði innan Æðeyjar eru um fimmtungur rúmmáls Ísafjarðardjúps. Niðurstöður straummælinga sýna sterkan meðalstraum út Djúp norðan megin, um 2 cm/s í botnlagi, um og yfir 4 cm/s í miðlagi og upp undir 8 cm/s í yfirborði (11. mynd). Straumar innan við Æðey eru almennt veikari og óreglulegri en utan eyjarinnar (9. og 12. mynd).

Eins og sjá má á 13. mynd er hiti á þessum tveim mælistöðvum lægstur í mars og hækkar síðan fram í miðjan nóvember er blöndun virðist ná niður í djúplagið. Súrefnisgildi í botnlagi (14. mynd) er hæst í mars og lækkar niður í lægsta gildi í lok september. Selta á mælitíma lagnanna (15. mynd) sýnir að innflæði af saltari sjó á sér stað yfir sumartímann og þess sjást merki í súrefnismælingunum einnig. Selta sjávarins er há í botnlaginu og bendir það til þess að sjór flæði inn Djúpál og inn Djúp eins og áður var nefnt og þannig verði einhver endurnýjun botnlags í ytra Ísafjarðardjúpi að sumrinu.



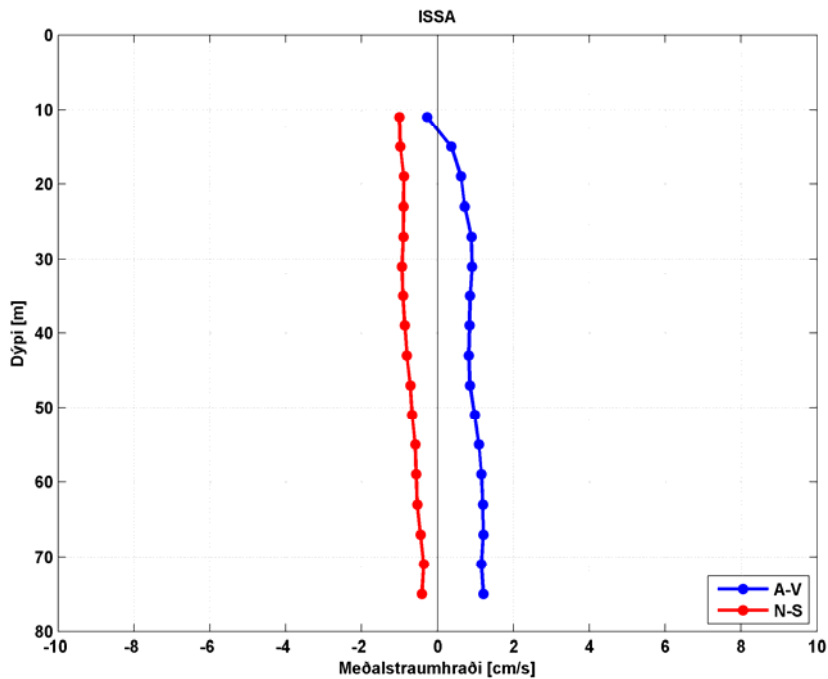
10. mynd. Niðurstöður mælinga (lóðréttir ferlar) í Ísafjarðardjúpi. Litir sýna tíma mælinga (mánuð ársins). Myndirnar sýna hita (°C), seltu, eðlisþyngd (kg m^{-3}) og súrefnisstyrk (ml l^{-1}) og mælistöðvar.

Figure 10. Results from observations (vertical profiles) in Ísafjarðardjúpi. The colours indicate the time of observation (month of year). The panels show temperature (°C), salinity, density (kg m^{-3}) and oxygen concentration (ml l^{-1}) as well as positions of the stations.



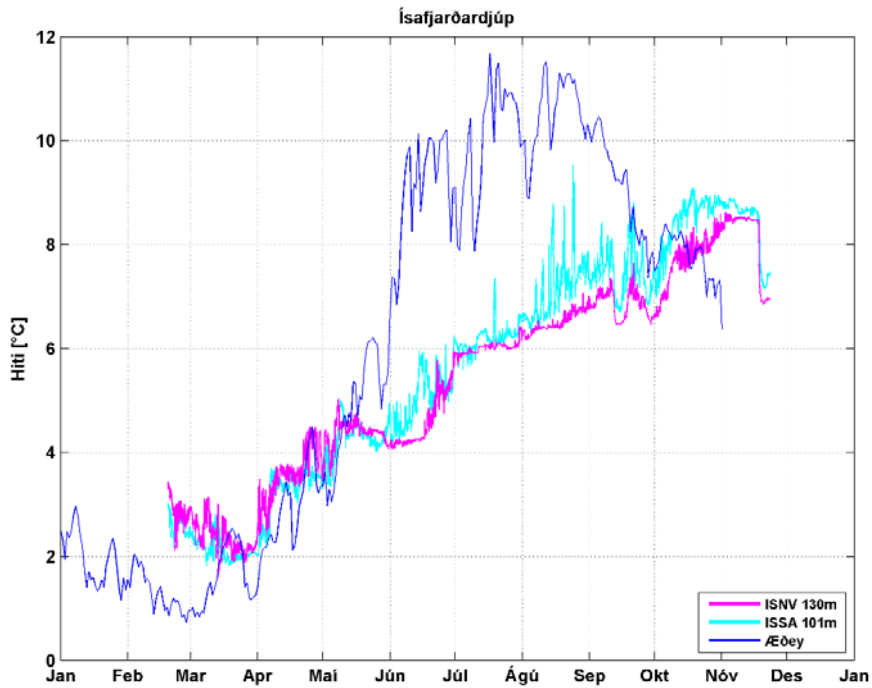
11. mynd. Meðalstraumhraði skipt í norður-suður og austur-vestur þætti eftir dýpi á mælistöð norðanmegin og utar í Ísafjarðardjúpi (ISNV lögn, sjá mynd 9) fyrir mælitímann febrúar til nóvember 2016.

Figure 11. The average current speed divided into north-south and east-west components as a function of depth from the mooring ISNV (see fig. 9) deployed from February to November 2016.



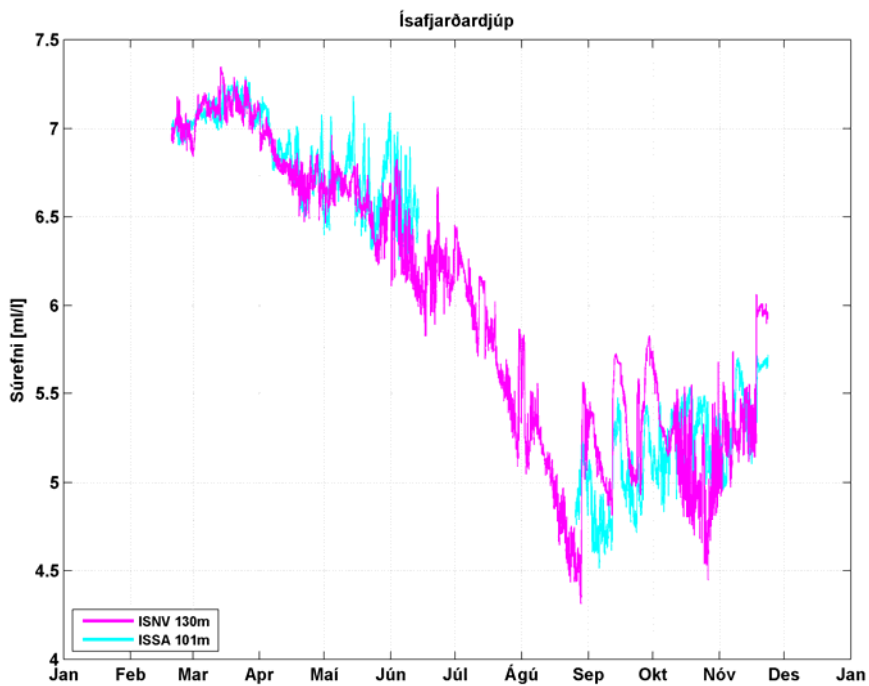
12. mynd. Meðalstraumhraði skipt í norður-suður og austur-vestur þætti eftir dýpi á mælistöð sunnanmegin og innar í Ísafjarðardjúpi (ISSA lögn, sjá mynd 9) fyrir mælitímann febrúar til nóvember 2016.

Figure 11. The average current speed divided into north-south and east-west components as a function of depth from the mooring ISSA (see fig. 9) deployed from February to November 2016.



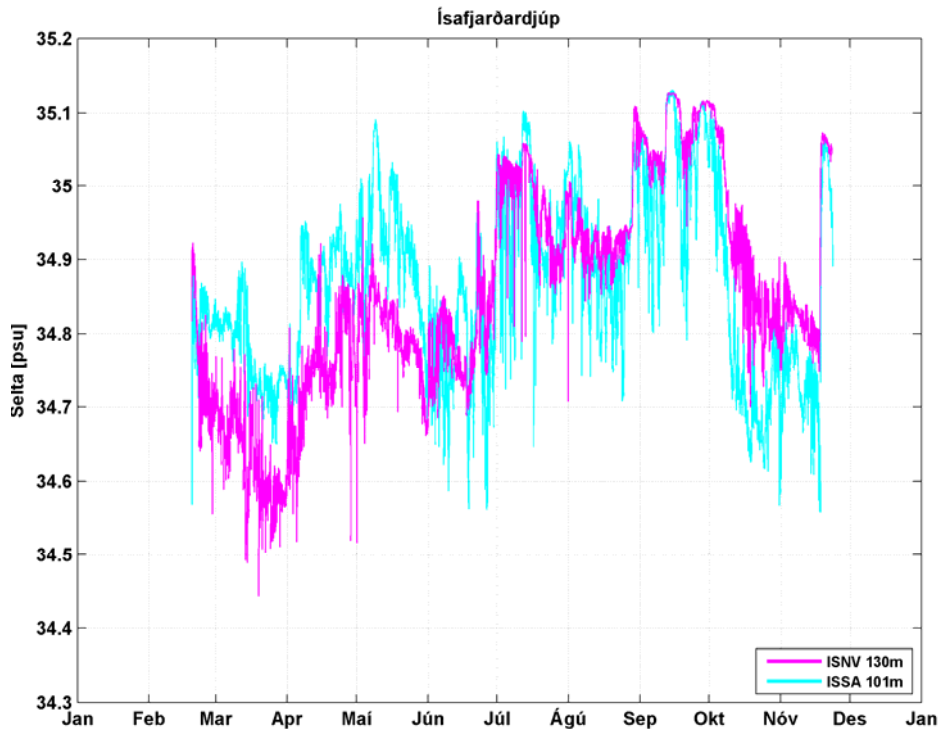
13. mynd. Hiti (°C) á mælistöðvum ISNV (fjólublátt) og ISSA (ljósblátt) febrúar til nóvember, ásamt yfirborðshita í Æðey (blátt) á árinu 2016.

Figure 13. Temperature (°C) from the moorings ISNV (purple) and ISSA (cyan) from February to November 2016 and surface temperature in Æðey (blue) from 2016.



14. mynd. Súrefni (ml l^{-1}) á mælistöðvum ISNV (fjólublátt) og ISSA (ljósblátt), febrúar til nóvember 2016.

Figure 14. Oxygen (ml l^{-1}) from the moorings ISNV (purple) and ISSA (cyan) from February to November 2016.



15. mynd. Selta á mælistöðvum ISNV (fjólublátt) og ISSA (ljósblátt), febrúar til nóvember 2016.

Figure 15. Salinity from the moorings ISNV (purple) and ISSA (cyan) from February to November 2016.

Með tilliti til stærðar fjarðarins og varúðarnálgunar varðandi raunveruleg áhrif eldisins einkum á botndýralíf og súrefnisstyrk var ráðlagt með þessu mati á burðarþoli að hægt sé að leyfa allt að 30 þúsund tonna eldi í Ísafjarðardjúpi á ári.

Umræður

Niðurstöður um þol svæðanna til að taka á móti lífrænum úrgangi byggir á mati á áhrifum eldisins á ýmsa umhverfisþætti strandsjávarvatnshlota eins og lýst er í reglugerð 535/2011 um flokkun vatnshlota, eiginleika þeirra, álagsgreiningu og vöktun. Einkum er horft til álags á lífríki botnsins, súrefnisstyrk og styrk næringarefna í sjó.

Ekki liggur enn fyrir matskerfi til að nota við mat á ástandi líffræðilegra gæðapátta í strandsjávarvatnshlotum. Sú krafa er gerð í lögum um stjórn vatnamála að ástand vatnshlota þeirra skuli ekki hnigna þrátt fyrir fiskeldi eða aðra starfsemi. Slík krafa gerir það að verkum að varlega þarf að fara við alla nýja stafsemi á strandsvæðum og gæta þess að umhverfisáhrifin verði afturkræf.

Líkanið hefur í flestum tilvikum náð að líkja eftir eðlisfræðilegum þáttum sem er nauðsynlegt til að hægt sé að byggja á öðrum þáttum þess sem meta vistfræði vatnsbolsins og botnsins og einnig áhrif fiskeldis á þessa þætti. Á 5. mynd eru sýndar niðurstöður súrefnismælinga í Arnarfirði og niðurstöður líkansins og næst þar ágæt samsvörun. Í mörgum tilfellum hefur verið hægt að nota hitamælingar sem Hafrannsóknastofnun gerir í höfnum til að sannreyna líkanið. Ákoma lífræns efnis á botn fjarða er mikilvæg stærð í flest öllum líkönum sem meta áhrif fiskeldisstarfsemi á súrefnisbúskap og botndýralíf og það flæði lífræns kolefnis (60 til $154 \text{ g C m}^{-2} \text{ ár}^{-1}$) til botns í Patreks- og Tálknafirði og í Arnarfirði

sem mælt var árið 2014 var töluvert hærra en þau staðalgildi sem líkönin nota (Sólveig R. Ólafsdóttir o.fl., 2015) og þurfti því að aðlaga líkönin að niðurstöðunum.

Staðsetning kvía skiptir töluverðu máli en ein af forsendunum inn í líkönin er hve stór hluti úrgangsins lendir í botnlaginu. Þar hafa þættir eins og botndýpi, stærð fóðuragna og straumur í miðri vatnssúlunni (dreifistraumur) mikið að segja. Straumhraði við botn hefur einnig áhrif á dreifingu úrgangsins og ef straumurinn er nægur þá getur botnfallið komist í sviflausn á nýjan leik (resuspension) og dreifst víðar sem gerir áhrifasvæðið stærra. Talið er að ef meðalstraumhraði við botn sé $3,5 \text{ cm s}^{-1}$ aukist líkurnar á þessu (Stigebrandt, 2011).

Við mat á álagi vegna fiskeldis þarf bæði að meta fóðurgjöfina sem og gera grein fyrir afdrifum efnanna í eldinu. Fóðurstuðlar sem framleiðendur hér á landi hafa miðað við á undanförnum árum eru á bilinu 1,1-1,3 sé miðað við framlögð gögn við mat á umhverfisáhrifum (sjá t.d. Fiskeldi Austfjarða hf, 2016, Sigurður Pétursson, 2017). Þar sem mesta álagið er þegar mest er fóðrað og vöxtur fisksins mestur skiptir máli að þær forsendur í líkaninu séu sem líkastar þeirri framkvæmd sem viðhöfð er við eldið. Af þeim sökum var reiknað með þeim fóðurstuðlum og því fóðrunarlíkani sem framleiðendur gáfu upp (Fjarðarlax 2014-2016). Við útreikninga var miðað við stuðulinn 1,27 sem talið var varfærið mat. Í líkönunum eru einnig gefnar forsendur um afdrif efnanna sem losuð eru við eldið. Rannsóknir hafa sýnt að breytilegt er hve mikil losunin er og á hvaða formi efnin eru (Price o.fl., 2015). Flestir framleiðendur hafa á undanförnum árum miðað við yfirlitsgrein eftir Wang og félagi (Wang o.fl., 2012) þegar þeir gera grein fyrir sinni losun en í þeirri grein er gerð grein fyrir losun frá sjókvíaeldi á laxi við Noreg.

Þar er gert ráð fyrir að 70% af öllu kolefni, 62% af köfnunarefninu og 70% af fosfórnum í fóðrinu sé losað á einn eða annan hátt til umhverfisins en einungis hluti efnanna lendir þó á botninum. Talið er að 48% af kolefninu losni sem CO₂ við öndun fisksins og 45% af köfnunarefnissamböndunum sé losað á uppleystu formi en að á hinn bóginn lendi stór hluti fosfórsins eða 44% á botninum. ACEXR líkanið reiknar sömuleiðis með að ákveðið magn kolefnis, köfnunarefnis og fosfórs sé losnað úr hverju kg af fóðri, hluti á föstu formi sem fellur á botninn, en uppleyst efni fer í vatnssúluna. Kolefni er breytt í CO₂ og stýrir því súrefnisþörf. Tölur í líkani eru frá Black o.fl., 2001, en fóðurmagn var miðað við fóðrunarlíkan frá Fjarðarlax 2014-2016 og því losnun og súrefnisþörf yfirlétt í samræmi við Wang o.fl., 2012.

Í ráðgjöf um burðarþol er tekið tillit til stærðar fjarðanna og varúðarnálgunar varðandi raunveruleg áhrif eldisins einkum á botndýralíf og súrefnisstyrk. Ætíð var metið álagið á 2 ári eldisins miðað við 3 ára eldisfasa en þá er álagið mest. Gert er ráð fyrir að nákvæm vöktun á áhrifum eldisins fari fram samhliða því. Slík vöktun er forsenda fyrir hugsanlegu endurmati á burðarþoli fjarðarins, til hækkunar eða lækkunar, sem byggt væri á raungögnum.

Margir aðrir líffræðilegir, vistfræðilegir og hagrænir þættir geta líka legið til grundvallar burðarþoli varðandi fiskeldið, t.d. skólplosun, smithætta, lyfjanotkun, erfðablöndun við villta stofna og veiðihagsmunir en ekki er tekið tillit til þeirra í þessu mati.

Rétt er að taka fram að endanleg burðarþolsmörk fyrir ákveðna firði eða svæði verða seint gefin út enda hefur slíkt varla verið gert í nágrannalöndunum, heldur er alltaf tekið með í reikninginn hvaða staðsetningar og hvers konar eldi er um að ræða og fara umhverfisáhrifin

eftir báðum þessum þáttum. Því má búast við að burðarþol fjarða og annarra eldissvæða verði endurmetið á næstu árum ef þörf krefur.

Þakkir

Þetta verkefni byggir á samstarfi margra starfsmanna Hafrannsóknastofnunar sérstaklega ber að nefna Magnús Danielsen, Alice Benoit-Cattin, Arnþór Braga Kristjánsson, Björn Björnsson og Jacek Sliwinsky. Þá fá Guðbergur Rúnarsson hjá Landssambandi Fiskeldisstöðva og Tryggvi Þórðarson hjá Umhverfisstofnum þakkir fyrir samstarfið.

Heimildir

- Anon. (2013). Veileder 02:2013. *Klassifisering av miljøtilstand i vann Økologisk og kjemisk klassifiseringssystem for kystvann, grunnvann, innsjøer og elver*. Vannportalen.no.
- Black, K.D. (2001). *Mariculture - Environmental, Economic and Social Impacts of*, in *Encyclopaedia of Ocean Sciences*. Eds. Steele, J., Thorpe, S. and Turekian, K. Academic Press, London, pp. 1578-1584.
- Buhl-Mortensen, L. Aure, J. Alve, E., Oug, E. & Husum K. (2006). *Effects of hypoxia on fjordfauna: The bottomfauna and environment in fjords on the Skagerrak coast* [in Norwegian]. *Fisken og Havet* 3:108 p.
- Dýrfiskur. (2014). *Mat á umhverfisáhrifum – tillaga að matsáætlun 4.000 tonna framleiðsla á regnbogasilungi í Borgarfirði og 4.000 tonna framleiðsla á regnbogasilungi í Trostansfirði*.
- Fiskeldi Austfjarða hf. (2016). Tillaga að matsáætlun vegna 10.000tonna framleiðslu á laxi í Seyðisfirði. <http://icefishfarm.is/wp-content/uploads/2015/10/Tillaga-a%C3%B0-mats%C3%A1%C3%A6tlun-Sey%C3%B0isfj%C3%B6r%C3%B0ur-2015.pdf>. Sótt 4. október 2017.
- Giles H. (2008). Using Bayesian networks to examine consistent trends in fish farm benthic impact studies. *Aquaculture* 274, 181–195.
- Héðinn Valdimarsson og Magnús Danielsen. (2014). *Endurteknar mælingar á hita, seltu og súrefni sjávar á föstum stöðvum í Patreks-, Tálkna-, Arnar-, Dýra- og Önundarfirði árin 2013 og 2014*. Hafrannsóknastofnun, skýrsla.
- Héðinn Valdimarsson, Andreas Macrande og Magnús Danielsen. (2014). *Straummælingar í Ísafjarðardjúpi 2012 til 2013*. Hafrannsóknastofnun.
- Portilla, E., Tett, P., Gillibrand, P.A. og Inall, Mark. (2009). Description and sensitivity analysis for the LESV model: Water quality variables and the balance of organisms in a fjordic region of restricted exchange. *Ecological Modelling, Vol, 220-18*, 2009, 2187- 2205.
- Price C, Black KD, Hargrave BT, Morris JA Jr. (2015). Marine cage culture and the environment: effects on water quality and primary production. *Aquacult Environ Interact* 6: 151-174. <https://doi.org/10.3354/aei00122>
- Reid G.K., Liutkus M., Robinson S.M.C., Chopin T.R., Blair T., Lander T., Mullen J., Page F. & Moccia R.D. (2009). A review of the biophysical properties of salmonid faeces: implications for aquaculture waste dispersal models and integrated multi-trophic aquaculture. *Aquaculture Research* 40, 257–273.
- Schlitzer, R., Ocean Data View, odv.awi.de. (2017).
- Sigurður Pétursson. (2017). Tillaga að matsáætlun, 10.000 tonna laxeldi í Dýrafirði. Framleiðsluaukning um 5.800 tonn í kynslóðaskiptu eldi. http://www.arcticfish.is/wp-content/uploads/bsk-pdf-manager/2017-07-26_7.pdf. Sótt 4. október 2017.
- Sólveig R. Ólafsdóttir. (2012). Svæðatengdur styrkur og nýting næringarefna í Íslandshafi / Regional distribution and uptake of nutrients in the Iceland Sea. Í *Vistkerfi Íslandshafs. Hafrannsóknir, nr. 164*.
- Sólveig R. Ólafsdóttir, Alice Benoit-Cattin og Jón Örn Pálsson. (2015). Mæling á náttúrulegri ákomu lífræns efnis í Arnarfirði, Patreksfirði og Tálknafirði / Flux of organic matter in Arnarfjörður, Patreksfjörður and Tálknafjörður. Í *Þættir úr vistfræði sjávar 2014. Hafrannsóknir nr. 181*.
- Steingrímur Jónsson, Héðinn Valdimarsson og Hjalti Karlsson. (2011). *Straummælingar og mælingar á ástandi sjávar í Ísafjarðardjúpi 2011*. Hafrannsóknastofnunin.
- Stigebrandt A., Aure J., Ervik A. & Hansen P.K. (2004). Regulating the local environmental impact of intensive marine fish farming. III. A model for estimation of the holding capacity in the MOM system (Modelling – Ongrowing fish farm – Monitoring). *Aquaculture* 234, 239–261.
- Stigebrandt, A. (2011). *Carrying capacity: general principles of model construction*. *Aquaculture Research. Special Issue: Proceedings of the International Symposium, Scottish Aquaculture: A sustainable future. Volume 42, Issue Supplement s1, pages 41–50*.
- Symonds, A.M. (2011). *A comparison between far-field and near-field dispersion modelling of fish farm particulate wastes*. *Aquaculture Research. Special Issue: Proceedings of the International Symposium, Scottish Aquaculture: A sustainable future. Volume 42, Issue Supplement s1, pages 73–85*.
- Tett, P., Portilla, E., Gillibrand, P.A. og Inall, M. (2011). *Carrying and assimilative capacities: the ACExR-LESV model for sea-loch aquaculture*. *Aquaculture Research. Special Issue: Proceedings of the International Symposium, Scottish Aquaculture: A sustainable future. Volume 42, Issue Supplement s1, pages 51–67*.
- Wang X, Olsen LM, Reitan KI, Olsen Y. (2012). Discharge of nutrient wastes from salmon farms: environmental effects, and potential for integrated multi-trophic aquaculture. *Aquacult Environ Interact* 2:267-283. <https://doi.org/10.3354/aei00044>



HAFRANNSÓKNASTOFNUN

Rannsókn- og ráðgjafarstofnun hafs og vatna