



HAF- OG VATNARANNSÓKNIR

MARINE AND FRESHWATER RESEARCH IN ICELAND

Mat á burðarþoli Arnarfjarðar – lýsing á líkani og mati á áhrifum sjókvíaeldis á súrefni og næringarefni /
Carrying capacity of Arnarfjörður – modelling and assessment of impacts of aquaculture on oxygen and nutrient budget

Andreas Macrander og Sólveig Rósa Ólafsdóttir

Mat á burðarþoli Arnarfjarðar –
lýsing á líkani og mati á
áhrifum sjókvíaeldis á súrefni og næringarefni /
*Carrying capacity of Arnarfjörður –
modelling and assessment of impacts of
aquaculture on oxygen and nutrient budget*

Andreas Macrander og Sólveig Rósa Ólafsdóttir

Upplýsingablað

Titill: Mat á burðarþoli Arnarfjarðar – lýsing á líkani og mati á áhrifum sjókvíaeldis á súrefni og næringarefni / *Carrying capacity of Arnarfjörður – modelling and assessment of impacts of aquaculture on oxygen and nutrient budget*

Höfundar: Andreas Macrander og Sólveig Rósa Ólafsdóttir

Skýrsla nr:

HV 2023-02

Verkefnisstjóri:

Höfundur

Verknúmer:

9233

ISSN

2298-9137

Fjöldi síðna:

21

Útgáfudagur:

10. febrúar 2023

Unnið fyrir:

Hafrannsóknastofnun og Umhverfissjóð sjókvíaeldis

Dreifing:

Opið

Yfirfarið af:

Rakel Guðmundsdóttir

Ágrip

Undanfarin ár hefur Hafrannsóknastofnun staðið fyrir rannsóknum á ástandi sjávar og umhverfi í flestum fjörðum landsins, m.a. til að meta burðarþol fjarða m.t.t. sjókvíaeldis. Litið er til laga um stjórn vatnamála (nr. 36/2011) þegar mat á burðarþoli er framkvæmt. Tilgreint er í lögum um stjórn vatnamála að ástand vatnshlota megi ekki hnigna vegna mengandi starfsemi eins og sjókvíaeldis. Í burðarþolsmati eru skoðuð áhrif fiskeldis á styrk súrefnis og næringarefna í viðkomandi firði. Matið byggir á mælingum á ástandi sjávar, straumum og endurnýjun, auk tölvulíkans sem hermir áhrif fiskeldisins.

Skýrsla þessi fjallar um líkanið ACEX/LESV, sem notað hefur verið við burðarþolsmat, og niðurstöður úr líkanaútreikningum á tilteknum firði, Arnarfirði. Líkanið er þriggja laga boxlíkan sem hermir ástand sjávar yfir heilt ár. Líkanið hefur verið stillt á þann hátt að það líkir eftir aðstæðum í Arnarfirði sem er þröskuldsfjörður með einangrað botnlag yfir sumar- og haustmánuðina. Vistfræðihluti líkansins hermir súrefnispörf við niðurbrot lífrænna efna á fjarðarbotni, auk styrks næringarefna sem hafa áhrif á plöntusvifsvöxt. Líkanið hermir áhrif fiskeldis með aukinni losun úrgangs, bæði í uppleystu og í föstu formi.

Líkanaútreikningar sýna að við 14.500 tonna fiskeldi í Arnarfirði má búast við að súrefnisstyrkur í botnlagi minnki um allt að 0,3 mL L⁻¹ síðsumars og að haustlagi. Áhrif næringarefna í uppleystu formi eru hins vegar takmörkuð vegna stærðar fjarðarins og öflugra vatnsskipta í efri lögum fjarðarins. Styrkur súrefnis vegna niðurbrots fasts úrgangs á botni er því takmarkandi þáttur við burðarþolsmat Arnarfjarðar, sérstaklega þegar lífrænn úrgangur lendir í botnlagi á meiri en 65 m dýpi.

Abstract

In recent years, the Marine and Freshwater Research Institute (MFRI) carried out measurements of the environmental conditions for most of the fjords of Iceland. This research is the basis for assessing carrying capacity of the fjords for aquaculture. This assessment is made with respect to the Water Framework Directive's biological quality indices. As specified by the Water Framework Directive, the ecological status of a given waterbody shall not deteriorate due to anthropogenic activities. The carrying capacity assessment is based on observations of hydrographic conditions, currents and water renewal, and a numerical model simulating the impact of fish farming on oxygen and nutrient budget in the respective fjord.

This report discusses the model used in the carrying capacity assessments, ACExR/LESV, and presents the model predictions for a specific fjord, Arnarfjörður. The model is a three layer box model simulating the hydrographic conditions in a fjord over an entire year. The model was adjusted to the conditions in Arnarfjörður, which is a threshold fjord, and its bottom layer isolated over the summer and fall seasons.

The ecological part of the model simulates the oxygen demand due to decomposition of organic material on the seafloor, and nutrients and phytoplankton growth. Aquaculture is implemented in the model by increasing the supply of wastes, both in dissolved and in particulate form.

Based on the model, it is expected that for 14,500 tons of fish farming in Arnarfjörður, dissolved oxygen in the bottom layer will be reduced by up to 0.3 mL L^{-1} in late summer and fall. Nutrients released in dissolved form are expected to have minor impact due to the size of the fjord, and strong water exchange above the threshold depth. Oxygen demand due to decomposition of particulate wastes on the bottom is thus the limiting factor in the carrying capacity assessment of Arnarfjörður, if organic wastes are ending up in areas deeper than 65 m.

Lykilorð: burðarþolsmat, sjókvíaelði, Arnarfjörður, líkan, súrefni, næringarefni, lög um stjórn vatnamála, líffræðilegir og eðlis-efnafræðilegir gæðapættir

Undirskrift verkefnisstjóra:

Rakel Guðmundsdóttir

Undirskrift forstöðumanns sviðs:

Þrönn Egilsdóttir

Leiðréttingar, ágúst 2023

Líkanaútreikningar og 4. mynd í skýrslunni miða við að helmingur fasts úrgangs lendi í botnlagi, en tölur í textanum samræmdust ekki við myndina, enda miðuðu tölurnar við að 100 % fasts úrgangs úr eldinu lendi í botnlagi. Ósamræmið, auk talnavillu við súrefnisstyrk í botnlagi án fiskeldis, hefur verið lagað þ. 28. ágúst 2023.

Leiðréttingar hafa engin áhrif á burðarþolsmati Arnarfjarðar sem er 20.000 tonn.

Eftirfarandi leiðréttingar hafa verið gerðar; leiðréttingar og viðbætur skrifaðar **feitletraðar**, en upphaflegar tölur eru sýndar með ~~þverstrík~~.

Ágrip

Líkanaútreikningar sýna að við 14.500 tonna fiskeldi í Arnarfirði má búast við að súrefnisstyrkur í botnlagi minnki um allt að **0,3 0,6** mL L⁻¹ síðsumars og að haustlagi

Abstract

[...] for 14,500 tons of fish farming in Arnarfjörður, dissolved oxygen in the bottom layer will be reduced by up to **0.3 0.6** mL L⁻¹ in late summer and fall. Nutrients-2 released [...]

bls. 12 lagfæring á tölu skv. myndinni:

Niðurstöður úr líkaninu sýna að súrefnisstyrkur í botnlagi (þykk rauð lína á 4. mynd) lækkar yfir sumarmánuðina, frá 7,2 mL L⁻¹ í apríl niður í **2,8 2,95** mL L⁻¹ í lok október

bls. 13 Figure 4, viðbót í enskum myndatexta í samræmi við íslenska textann:

The heavy red line shows oxygen levels in the bottom layer without fish farming, and light lines indicate oxygen concentration with 5,000, 10,000, 14,500, and 20,000 tons of fish farming, respectively, **assuming that 50 % of solid wastes end up in the bottom layer.**

bls. 15 fyrsta málsgrein:

Niðurstöður líkansins (4. mynd) sýna að súrefnisstyrkur í botnlagi Arnarfjarðar að hausti lækkar nokkuð línulega með umfangi fiskeldis, eða um **-0,1 -0,2** mL L⁻¹ á hver 5.000 tonn í eldi, **miðað við að helmingur fasts úrgangs lendi í botnlagi**. Við 14.500 tonna fiskeldi og 17.000 tonna fóðurnotkun á ári skv. eldisáætlun Arnarlax (Verkís, 2019) er lágmarksstyrkur súrefnis í botnlagi um **0,3 0,6** mL L⁻¹ lægri en án fiskeldis. Lágmarksgildi er um **2,8 2,9** mL L⁻¹ án fiskeldis (**41 39** % metnun), en um **2,5 2,4** mL L⁻¹ (**35 33** % metnun) með 14.500 tonna eldi í stuttan tíma að hausti. Ef fiskeldi eykst í allt að 20.000 tonn má gera ráð að súrefnisstyrkur í botnlagi lækki um allt að **0,4 0,8** mL L⁻¹, og lágmarksgildin yrðu um **2,4 2,2** mL L⁻¹ (**33 31** % metnun) í stuttan tíma að hausti. **Lækkun súrefnisstyrks yrði hlutfallslega meiri ef meira en helmingur úrgangs lendi í botnlagi.**

bls. 17, áhrif úrgangs í föstu formi:

Við líkanaútreikninga var gert ráð fyrir að helmingur úrgangsins lendi í botnlaginu og niðurstöður eru, að þá nemur lækkun súrefnisstyrks í október um **0,3 0,6** mL L⁻¹ við 14.500 tonna eldi og **0,4 0,8** mL L⁻¹ við 20.000 tonna eldi.

bls. 19, samantekt:

Við 14.500 tonna þriggja kynslóða eldi má gera ráð fyrir að súrefnisstyrkur í botnlagi verði allt að **0,3 0,6** mL L⁻¹ lægri að haustlagi, **miðað við að helmingur fasts úrgangs lendi í botnlagi.**

Efnisyfirlit

Töfluskrá	i
Myndaskrá	i
Inngangur	1
Gögn og aðferðir	2
Staðhættir.....	2
Mælingar á ástandi sjávar í Arnarfirði	3
Líkanið ACEXR/LESV	4
Nánar um eðlisfræðilíkanið ACEXR	5
Nánar um vistfræðilíkanið LESV	6
Aðferðafræði	7
Niðurstöður	10
Ástand sjávar samkvæmt líkaninu.....	10
Vistfræðilegir þættir samkvæmt líkaninu	12
Áhrif álags frá fiskeldi samkvæmt líkaninu.....	15
Umræður	16
Samantekt	19
Þakkarorð	19
Heimildir	20

Töfluskrá

Tafla 1. Helstu stærðartölur frá Arnarfirði.	3
Tafla 2. Losun næringarefna og kolefnis miðað við fóðurmagn, skv. Wang o.fl. (2012)	9

Myndaskrá

1. mynd. Kort með örnefnum og botndýpi Arnarfjarðar.	2
2. mynd. Skýringarmynd á ACEXR eðlisfræðilíkaninu.....	5
3. mynd. Niðurstöður úr ACEXR líkaninu og ástand sjávar í Arnarfirði.	11
4. mynd. Niðurstöður úr LESV líkaninu: Súrefnisstyrkur í Arnarfirði.	13
5. mynd. LESV líkanið: Styrkur næringarefna í Arnarfirði.	14
6. mynd. LESV líkanið: Plöntusvif í Arnarfirði, metið sem blaðgræna í mg m^{-3}	15

Inngangur

Undanfarin ár hefur Hafrannsóknastofnun staðið fyrir rannsóknum á ástandi sjávar og umhverfi í flestum fjörðum landsins. Tilgangur mælinganna var að safna gögnum sem gæfu upplýsingar um árstíðabreytileika í straumum, súrefnisbúskap og öðrum umhverfisþáttum fjarða sem er forsenda þess að geta gert mat á burðarþoli fjarða með tilliti til fiskeldis í opnum sjókvíum.

Undanfari leyfisveitinga til sjókvíaeldis við Ísland er mat á burðarþoli svæða og hefur svo verið frá lagasetningu árið 2014. Burðarþol er skilgreint í lögum um fiskeldi sem „*mat á þoli fjarða eða afmarkaðra hafsvæða til að taka á móti 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. Hluti burðarþolsmats er að meta óæskileg staðbundin áhrif af eldisstarfsemi*“.

Lögum og reglugerð um stjórn vatnamála (e. Water Framework Directive) fylgja skilgreiningar á líffræðilegum gæðapáttum og ástand vatnshlota (e. waterbodies) skal metið út frá þeim. Fyrir strandsjó eru þessir þættir botndýr á mjúkum botni, plöntusvif (blaðgræna *a*) og stórbörungar á hörðum botni (fjöru) ásamt eðlisefnafræðilegum stuðningsþáttum (Agnes Eydal o.fl., 2014; Sólveig R. Ólafsdóttir o.fl., 2019; Rake! Guðmundsdóttir o.fl. 2022). Markmið laga um stjórn vatnamála (vatnatilskipunar) er að ástand vatnshlota (t.d. fjarða eða hafsvæða) sé „*gott*“ eða „*mjög gott*“ og að ástand þeirra versni ekki vegna mengandi starfsemi eins og t.d. sjókvíaeldis.

Frá fiskeldi í opnum sjókvíum losna næringarefni og lífrænt bundið efni í uppleystu og föstu formi (útskilnaður frá eldisfiskum og fóðurleifar). Sú losun getur haft áhrif á alla þá gæðapætti (botndýr, plöntusvif, botnbörunga og næringarefni) sem lög um stjórn vatnamála skilgreina. Markmið mats á burðarþoli er að setja hámark á þann lífmassa eldisfiska sem óhætt er talið að ala meg! á afmörkuðu svæði (firðir eða hafsvæði) þannig að ástand þess hnigni ekki. Við mat á burðarþoli fjarða og hafsvæða er byggt á mælingum á hafeðlis- og efnafræðilegum þáttum og útreikningum með líkani á afdrifum þeirra efna sem losuð eru frá dæmigerðu sjókvíaeldi og mati á áhrifum losunarinnar á líffræðilega gæðapætti.

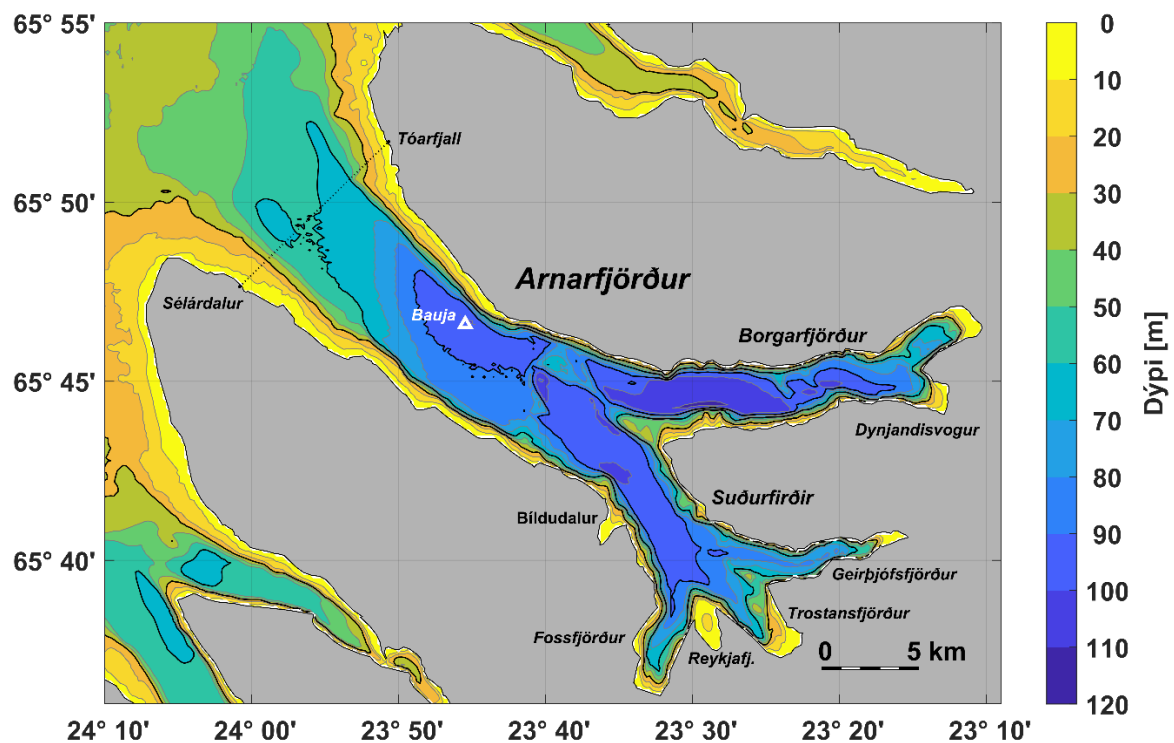
Skýrsla þessi lýsir líkaninu (ACExR/LESV) sem notað hefur verið við að meta áhrif efnalosunar frá sjókvíaeldi við Ísland og beitingu þess á vatnshlotið Arnarfjörð. Arnarfjörður er þröskuldsfjörður sem er með einangrað botnlag frá sumarlagi fram á haust (Andreas Macrander o.fl., 2021). Í skýrslunni eru niðurstöður úr líkanaútreikningum sem miða við þá stærð eldis sem fyrirhuguð var á árinu 2019 bornar saman við mælingar á ástandi sjávar og súrefnisstyrk í firðinum.

Gögn og aðferðir

Mælingum sem liggja á bak við matið er lýst í skýrslu eftir Andreas Macrander o.fl. (2021). Hér skal þó greint frá helstu staðháttum og ástandi sjávar í Arnarfirði, sem skipta miklu máli við uppsetningu líkansins.

Staðhættir

Arnarfjörður (1. mynd) er stór og djúpur fjörður á Vestfjörðum, en hann er einn af örfáum þröskuldsfjörðum sem finnast á Íslandi (Anon., 2017). Mesta dýpið í firðinum er 113 m, en dýpi í fjarðarmynni er aðeins um 65 m, og jafnvel enn grynna um 5 – 10 km fyrir utan fjörðinn. Þröskuldurinn gerir það að verkum að aðstæður í Arnarfirði líkjast því sem finnst í mörgum fjörðum í Noregi þar sem þröskuldsfirðir eru algengir. Áhrif þröskuldans eru þó minni en búast má við því hann er staðsettur frekar utarlega í firðinum þar sem straumar og öldurót geta verið mikil sem þá minnka áhrif haftsins. Í frekari greiningu út frá mæligögnum og í líkaninu er því miðað við þröskuldsdýpi 65 m í línu frá Selárdal að Tóarfjalli sem hér er notuð til að afmarka ytri mörk fjarðarins.



1. mynd. Kort með örnefnum og botndýpi Arnarfjarðar. Dýptargögn byggja á fjölgeislamælingum. Litir aðgreina 10 m dýptarbil, en svartar línur eru við 30, 60 og 90 m dýpi. Punktalínur greina ytri mörk Arnarfjarðar sem notuð er í skýrslunni. Hvítur þríhyrningur táknar staðsetningu mælibauju í utanverðum firðinum.

Figure 1: Place names and bathymetry of Arnarfjörður, based on multibeam data. Color interval 10 m; black contours denote 30, 60 and 90 m depth. The dotted line denotes the outer boundary of Arnarfjörður, as used in this report. The white triangle denotes the position of the measurement buoy in outer Arnarfjörður.

Flatarmál Arnarfjarðar (tafla 1) er um 274 km², meðaldýpi er 63 m, en víða í firðinum er dýpið um 90 – 113 m. Utanverður Arnarfjörður er um 7 km að breidd, en innarlega klofnar fjörðurinn í Borgarfjörð annars vegar, og Suðurfirði hins vegar. Botninn hallast bratt niður að meira en 90 m dýpi á flestum stöðum og lítið er um grunn svæði nema innst í Suðurfjörðunum. Það eru nokkrir hryggir á botninum, en þeir virðast ekki hafa áhrif á strauma og blöndun sjávar og má því skilgreina Arnarfjörðinn sem einn samfelldan viðtaka (Andreas Macrander o.fl., 2021).

Tafla 1. Helstu stærðartölur frá Arnarfirði.

Table 1: Key dimensions of Arnarfjörður.

	Arnarfjörður
Mesta dýpi	113 m
Meðaldýpi	63 m
Lengd	36 km
Breidd	3 – 7 km
Flatarmál	274 km ²
Rúmmál	17,4 km ³
Rúmmál ofan við þröskuldsdýpi 65 m	13,9 km ³
Rúmmál botnlags (65 m – 113 m)	3,6 km ³
Þröskuldur mesta dýpi	65 m
Þröskuldur meðaldýpi	43 m
Þröskuldur breidd	10,6 km
Þröskuldur þversnið	461.000 m ²

Mælingar á ástandi sjávar í Arnarfirði

Umfangsmiklar mælingar á ástandi sjávar, straumum og súrefni í Arnarfirði hafa verið gerðar undanfarin ár. Burðarþolsmat Arnarfjarðar og uppsetning líkansins byggja aðallega á mælingum frá ágúst 2014 – febrúar 2015 (Hafrannsóknastofnun, 2022a). Í þessari samantekt er þó einnig horft til gagna frá mælibauju sem staðsett var í utanverðum Arnarfirði árið 2019 (sjá 1. mynd fyrir staðsetningu). Ástand sjávar skv. gögnunum frá 2019 má telja svipað og í eldri mælingum í firðinum (Andreas Macrander o.fl., 2021), en mælingarnar frá 2019 henta betur til samanburðar við líkanið, enda taka bæði líkanið og mælingarnar til allrar vatnssúlunnar og eru samfelldar yfir heilt ár.

Það er einkennandi fyrir Arnarfjörð að sjórinn í firðinum er vel uppblandaður á veturna og súrefnisstyrkur vatnssúlunnar er hár eða nærri 90 % mettun. Á sumrin og haustin er fjörðurinn hins vegar skiptur í þrjú aðskilin lög:

(1) Í efstu 10 – 20 m er eðlislétt yfirborðslag, þar sem sjór hlýnar vegna sólargeislunar, og selta er minni en í neðri lögum vegna ferskvatnsrennslis frá landi.

(2) Miðlag er á bilinu 20 – 65 m dýpi og líkist það mest strandsjó á landgrunninu. Endurnýjun er á miðlaginu með innstreymi strandsjávar allt árið.

(3) Einangrað botnlag fyrir neðan þröskuldsdýpi er á um það bil 65 – 113 m dýpi. Mælingar benda til þess að vatnsskiptin við botnlagið séu lítil frá apríl fram í nóvember. Ólíkt efri lögum er hlýnun botnlags um sumarið frekar hæg og nær hitinn í botnlagi hámarki seint eða í október/nóvember, og súrefnisstyrkur þess lækkar stöðugt yfir sumar- og haustmánuðina. Lágmarksgildi í styrk súrefnis er yfirleitt náð í október / nóvember og er þá á bilinu 2,4 – 4,0 mL L⁻¹ (30 – 60 % súrefnismettun).

Á haustin hverfur eðlisþyngdamunur laganna þriggja vegna kólnunar yfirborðs, og botnlag endurnýjast skyndilega og gerist það yfirleitt á 1 – 2 dögum í nóvember. Við þessa uppblöndun hækkar styrkur súrefnis í botnlagi á ný.

Straummælingar í Arnarfirði sýna að innstreymi í fjörðinn er aðallega sunnanmegin á 20 – 60 m dýpi, en útstreymi norðanmegin í firðinum, einkum við yfirborð. Meðalstraumhraði er um 3,7 cm s⁻¹ (Steingrímur Jónsson, 2006) til 8 cm s⁻¹ í útstreymi (Andreas Macrander o.fl., 2021). Straumkerfi má útskýra með áhrifum snúnings jarðar og má búast við slíkri hringrás í stærri fjörðum á norðurhveli jarðar eins og Arnarfirði. Breytileiki í straumstyrk og -stefnu er þó mikill, vegna áhrifa vinda og, í minna mæli, vegna sjávarfalla.

Líkanið ACEXr/LESV

Nokkur líkön hafa verið þróuð í Noregi og Skotlandi fyrir mat á umhverfisáhrifum sjókvíaeldis (Stigebrandt 2001; Cromey o.fl., 2002) en ákveðið var að nota skoska líkanið ACEXr/LESV (Tett o.fl., 2011) til að meta áhrif þess á ástand sjávar, sérstaklega á súrefnis- og næringarefnastyrk ásamt áhrifa á blaðgrænu (magn plöntusvifs).

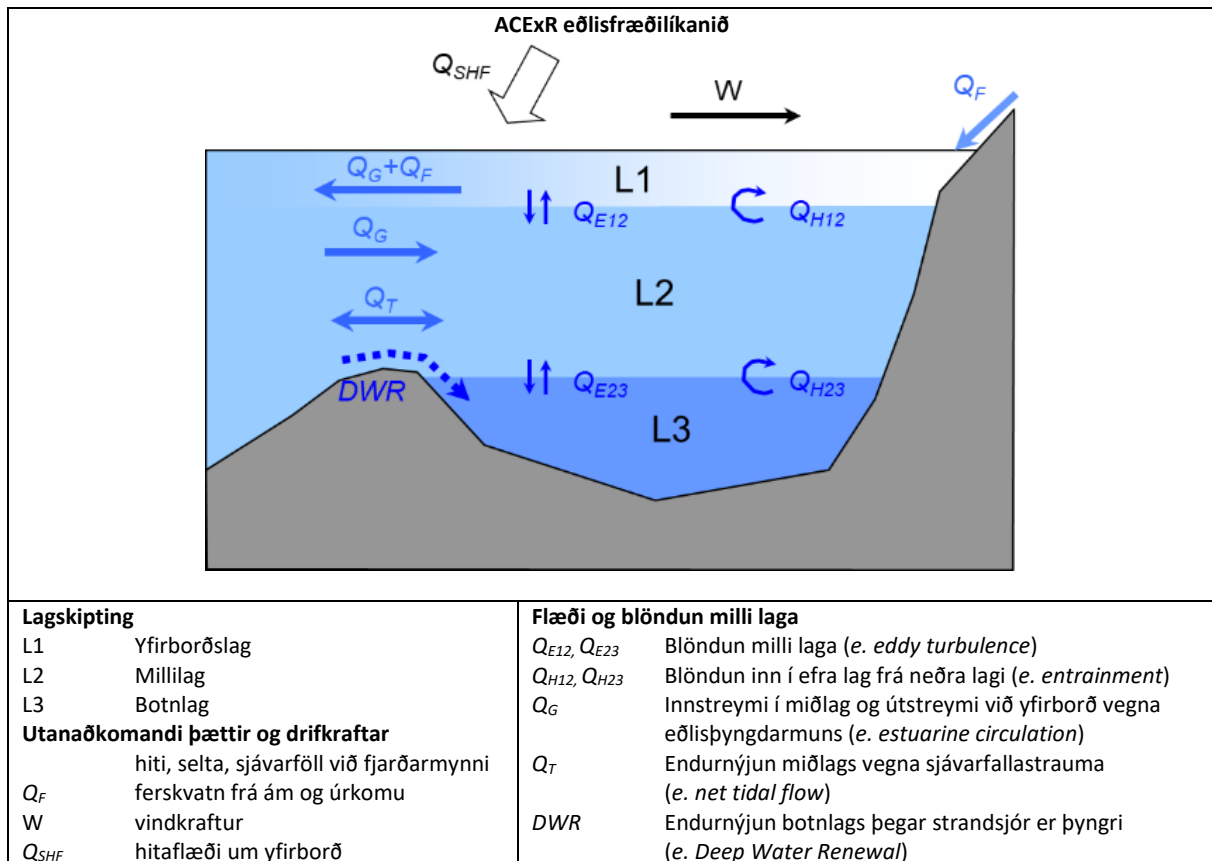
ACEXr/LESV er þriggja laga boxlíkan, sem hermir bæði eðliseiginleika sjávar (hiti, selta, o.fl.), og efna- og líffræðilega þætti (náttúruleg næringarefni og úrgang frá sjókvíaelði, súrefni og plöntusvif) yfir heilt ár.

Líkanið samanstendur af tveimur hlutum, ACEXr sem er eðlisfræðilega líkanið og LESV sem notar niðurstöður úr eðlisfræðilíkaninu sem inntak og hermir eftir vistfræðilegum þáttum. Virkni líkansins var sannreynd með samanburði við mælingar í Arnarfirði, m.a. með tilliti til endurnýjunar botnlags og lækkunar súrefnis við náttúrulegar aðstæður. Álag frá sjókvíaelði var svo bætt við í vistfræðilíkanið og áhrif eldis af mismunandi stærðargráðu á súrefni, næringarefni og plöntusvif metin.

Nánar um eðlisfræðilíkanið ACExR

Eðlisfræðilíkanið ACExR (Tett o.fl., 2011) byggir á öðru eldra líkani er kallast Ancylos / FjordEnv (Stigebrandt, 2001) og gert var með hliðsjón af fjörðum í Noregi til að meta álag frá sjókvíaelði. Bæði þessi líkөн skipta fjörðum upp í þrjú dýptarlög: Yfirborðs-, milli- og botnlag, en myndræna framsetningu helstu þátta líkansins má sjá á 2. mynd.

Norska líkanið FjordEnv líkir eftir meðalástandi sem má telja góða nálgun á stórum og djúpum fjörðum eins og í Noregi sem eru lagskiptir allt árið. Ólíkt FjordEnv keyrir skoska líkanið hins vegar yfir 365 daga og var það talið hentugra til að nota við íslenskar aðstæður þar sem íslenskir firðir eru yfirleitt grynri, árstíðamunur er mikill og endurnýjun á veturna nær niður til botns. Hiti og selta í dýptarlögunum þremur breytist fyrir tilstuðlan ytri áhrifa, eins og inn- og útstreymi, sem og blöndunar á milli laga (2. mynd).



2. mynd. Skýringarmynd á ACExR eðlisfræðilíkaninu, og helstu flæði sem skilgreind eru í líkaninu.

Figure 2: Schematics of the physical model, ACExR, and main fluxes in the model.

Yfirborðslag og millilag endurnýjast með inn- og útstreymi allt árið. Þetta streymi fer eftir stærð fjarðarmynnis, sjávarföllum o.fl. en eiginleikar strandsjávar á landgrunninu úti fyrir breytist með árstímum. Mæligögn á ástandi sjávar á landgrunninu (sjá t.d. Sólveig R. Ólafsdóttir o. fl., 2020) eru notuð fyrir greiningu á hita og seltu strandsjávar í líkaninu.

Helstu þættir sem breyta eiginleikum yfirborðs- og millilaga í líkaninu eru innstreymi strandsjávar, inngeslun frá sólu og ferskvatnsflæði frá ám og úrkomu. Eðlisþyngdarmunur milli laga stuðlar að útstreymi ferskvatns á yfirborði og innstreymi strandsjávar á miðlagi (e. estuarine circulation). Þá endurnýjast sjór að hluta með sjávarföllum.

Þó firðir geti verið lagskiptir (a.m.k. á sumrin), valda vindkraftur, sjávarföll og straumar ávallt iðustreymi (e. eddy turbulence) og ákveðinni blöndun milli laga. Þá getur eðlisþyngri sjór úr dýpri lögum blandast inn í efri lög þegar straumhraðinn er meiri í efra lagi (e. entrainment). Afleiðingar blöndunar milli laga er að yfirborðslag er ekki hreint ferskvatn heldur blöndun af ferskvatni og sjó. Jafnframt blandast alltaf eitthvað af súrefni niður í dýpri lög.

Botnlag innan við þröskuld getur verið einangrað að mestu leyti, en ef strandsjór er eðlisþyngri á veturna getur hann streymt inn í botnlag (e. Deep Water Renewal).

Hægt er að setja líkanið upp með tveimur dýptarlögum og á sú uppsetning við fyrir opna firði án þröskulds, t.d. Fáskrúðsfjörð (Hafrannsóknastofnun, 2022b). Í þröskuldsfjörðum eins og Arnarfirði er umhverfinu hins vegar best lýst með þremur dýptarlögum þar sem neðsta lagið er fyrir neðan þröskuldsdýpi. Líkanið gerir ráð fyrir að botnlagið sé að mestu leyti einangrað þegar efri lögin eru hlýrri og eðlisléttari, sem gerist á sumrin, en hermir samt ákveðna blöndun jafnvel á sumrin út af iðustraumum. Innstreymi af sjó fer í það lag sem hefur svipaða eðlisþyngd og innstreymið, en innstreymi í botnlag gerist eingöngu þegar sjór utan við fjarðarmynni er eðlisþyngri en botnlagið í firðinum, þ.e. helst að vetrarlagi.

Nánar um vistfræðilíkanið LESV

Hinn hluti líkansins er vistfræðilíkanið LESV, sem hermir breytingar á styrk næringarefna, súrefnis og plöntusvifs yfir heilt ár. Vistfræðilíkanið er keyrt með niðurstöðum frá eðlisfræðilíkani (sjá fyrir ofan), en auk þess eru gögn um styrk þriggja næringarefna (nítat, fosfór, kísill) í sjó utan fjarðar notuð sem inntak í líkanið (Sólveig R. Ólafsdóttir o.fl., 2017). Þá þarf einnig að taka tillit til annarra uppspretta af næringarefnum eins og þeim sem berast með ám og skólpi. Líkanið hermir styrk næringarefna (nítat, fosfór, kísill) í botn-, mið- og yfirborðslagi. Næringarefnastyrkur, hiti og ljós stýra í líkaninu vexti plöntusvifs eftir árstíma.

Þegar lífverur eins og þörungar deyja sökkva þær til botns sem lífrænt efni, en lífrænt efni inniheldur talsvert magn af kolefni. Þetta náttúrulega kolefnisflæði til botns (Sólveig R. Ólafsdóttir o. fl., 2015) er ein helsta ástæðan fyrir súrefnisminnkun í botnlagi fjarða, þar sem bakteríur og örverur nota súrefni til niðurbrots lífræna efnisins og framleiða við það CO₂. LESV-líkanið hermir eftir þessu ferli.

Álag frá fiskeldi er skilgreint í líkaninu með kolefnisákomu og magni köfnunarefnis og fosfórs sem fer í sjó bæði á uppleystu og föstu formi. Uppleystu efnin fara helst í yfirborðs- og millilag,

sem endurnýjast með inn- og útstreymi yfir þröskuldinn allt árið. Líkanið gerir ráð fyrir að aukinn styrkur á næringarefnum geti aukið vöxt plöntusvifs.

Gert er ráð fyrir að lífrænt bundið kolefni sé brotið niður í koltvísýring (CO_2) og að til þess þurfi súrefni úr yfirborðs-, mið- eða botnlagi, eftir því dýpi sem lífrænu efnin eru losuð á. Stærsti hluti þess kolefnis sem losnar frá fiskeldi er í föstu formi, þ.e. óétið fóður og saur sem sekkur á botninn nálægt eldiskvíum. Líkanið gerir ráð fyrir að niðurbrot kolefnis á botninum gerist strax, þ.e. að ekki verði uppsöfnun í hauga og að niðurbrotið eigi sér ekki stað við súrefnissnautt ástand. Hlutfall fasts úrgangs sem fer í botnlag er hægt að stilla m.t.t. botndýpis undir eldiskvíum. Líkanið gerir þá ráð fyrir að súrefni sem nauðsynlegt er til niðurbrots fari lækandi úr botnlagi og miðlagi í samræmi við aðstæður og lífmassa.

Aðferðafræði

Líkanaútreikningar fara fram í þrem megin skrefum:

- 1) Stilla skal eðlisfræðilíkanið (ACExR) þannig að ástand sjávar (hiti og selta) í líkaninu sé í samræmi við mælingar
- 2) Stilla skal vistfræðilíkanið (LESV) þannig að súrefni í botnlagi sé í samræmi við mælingar
- 3) Bæta við líkanið álagi frá fiskeldi

Í þessum kafla er aðferðafræðinni lýst nánar:

1) Stilla eðlisfræðilíkanið

Eðlisfræðilíkanið er stillt að aðstæðum í hverjum firði, þar sem flatarmál, dýpi, botnlögun og fleira er tekið til greina (tafla 1). Upplýsingar um hita og seltu í strandsjó fyrir utan fjörðinn komu úr gagnagrunni Hafrannsóknastofnunar; veðurfar (vindur, lofthiti, o.fl.) frá athugunum Veðurstofunnar, auk þess sem önnur veðurfarsgögn, NCEP/NCAR (Kalnay o.fl., 1996), eru notuð. Blöndunarstuðlar í líkaninu eru stilltir þannig að hiti og selta í lögnum þremur passa við þær athuganir sem gerðar hafa verið.

Helstu kennistærðir sem voru athugaðar við að meta hvort endurnýjun sjávar í Arnarfirði samkvæmt líkaninu væru raunhæfar voru:

- a) Hiti, selta við yfirborð og botn ásamt þykkt sjávarlaganna á sumrin;
- b) hraði hlýnunar botnlags yfir sumar- og haustmánuðina;
- c) dagsetning þegar alblöndun hefst síðla hausts.

Mælingar sýna nokkuð stöðuga hlýnun í botnlagi Arnarfjarðar að sumarlagi, en hraði hlýnunar gefur góða vísbendingu um stærðargráðu blöndunar inn í botnlagið. Hægt er að aðlaga

stillingar í líkaninu þannig að útreiknaðar breytingar í botnlagi líkist mælingum sem mest. Þá skiptir miklu máli hvenær lagskipting hverfur og endurnýjun í botnlagi hefst. Þegar útreiknuð gildi þessara þátta passa vel við mælingarnar er líklegt að stillingar og stuðlar í líkaninu séu réttar.

2) Stilla vistfræðilíkanið

Við stillingu vistfræðilíkansins er sérstaklega horft til styrks næringarefna (nitrats, fosfórs og kísils), framvindu plöntusvifs, náttúrulegs kolefnisflæðis á botn og notkunar súrefnis við niðurbrot lífrænna efna. Náttúrulegur styrkur á köfnunarefni, fosfór og kísli er stillt í samræmi við mælingar í strandsjó (Sólveig R. Ólafsdóttir o.fl., 2017). Styrkur næringarefna getur verið takmarkandi þáttur fyrir þörungavöxt og skiptir því miklu máli. Magn plöntusvifs getur verið mjög misjafnt frá einum tíma til annars en metið er hvort vöxtur þess í líkaninu sé raunhæfur.

Hægt er að stilla náttúrulegt kolefnisflæði í líkaninu og hefur ákoma þess mikil áhrif á útreikninga á súrefnisstyrk í botnlagi. Mælingar með setgildrum á náttúrulegu kolefnisflæði skiluðu mjög mismunandi niðurstöðum efir staðsetningu, jafnvel í sama firði (Sólveig R. Ólafsdóttir o.fl., 2015) og reyndist því erfitt að skilgreina meðalgildi fyrir heilan fjörð, t.d. Arnarfjörð. Hér var farin sú leið að stilla kolefnisflæði í líkaninu þannig að lækkun súrefnis í botnlagi samræmdist mælingum.

3) Bæta við álagi frá fiskeldi í vistfræðilíkanið

Þegar bæði eðlisfræðilíkanið er stillt til þess að herma eftir árstímabreytingum á ástandi sjávar, og vistfræðilíkanið eftir náttúrulegu ástandi næringarefna og súrefnis, er þriðja skrefið að bæta við álagi frá fiskeldi. Það er gert m.a. með því að skilgreina fóðurnotkun og voru þar tölur frá eldisfyrirtækjum hafðar til hliðsjónar (sjá frummatsskýrslur og matsskýrslur m.a. frá Arctic Sea Farm, 2018; Verkís, 2019). Eldisferli á einni kynslóð á einu eldissvæði nær almennt yfir 2 – 3 ár, en við mat á burðarþoli er horft til þess árs þar sem lífmassi tiltekins árgangs á tilteknu svæði og álag eru í hámarki. Stillingar í líkanakeyrslum miðast við að fóðurstuðull, þ.e. kg fóður á kg lífmassa eldisfisks, sé 1,18. Þá er gert ráð fyrir að losun köfnunarefnis, fosfórs og kolefnis í uppleystu og föstu formi sé í ákveðnum hlutföllum af fóðurmagni, eins og lýst er hjá Wang o.fl. (2012).

Með þessum upplýsingum má áætla losun næringarefna og kolefnis, en tafla 2 sýnir dæmigerðar tölur fyrir 14.500 tonna eldi, sem er það eldismagn sem Arnarlax gerði ráð fyrir við mat á umhverfisáhrifum árið 2019 (Verkís, 2019). Tölur miðast við hámarkslífmassa fiska við slátrun, en með fóðurstuðul 1,18 er heildarfóðurmagn um 17.000 tonn yfir eldistímabil viðkomandi fiska (um 2 – 3 ár) í þessu dæmi. Við þriggja kynslóða eldi eins og Arnarlax gerir ráð fyrir í Arnarfirði (Verkís, 2019), er árlegt fóðurmagn einnig áætlað um 17.000 tonn og taflan

sýnir því árlega losun efna úr fóðri í Arnarfirði. Ef lífmassi í firðinum færi upp í allt að 20.000 tonnum sem er hámarkslífmassi skv. núgildandi burðarþolsmati (Hafrannsóknastofnun, 2022a) væru áhrif á súrefni hlutfallslega meiri.

Niðurstöður Wang o.fl. (2012) (tafla 2) eru að um 15 % af heildarmagni köfnunarefnis í fóðri, 44 % fosfórs, sem og 19 % kolefnis sé losað í umhverfi sem fastur úrgangur á botn. Auk þess eru um 48 % köfnunarefnis og 21 % fosfórs úr fóðri losnuð í uppleystu formi, og 48 % kolefnis er losað sem koltvísýringur (CO₂) við öndun fiska. Losun uppleystra efna fer helst fram í efri lögum.

Til þess að meta burðarþol m.t.t. fyrrgreindra forsendna er líkanið keyrt nokkrum sinnum með stillingum fyrir Arnarfjörð, bæði án fiskeldis, og með fiskeldi af mismunandi stærðargráðu (5.000, 10.000, 14.500 og 20.000 tonna hámarkslífmassi). Gert er ráð fyrir að helmingur fasts úrgangs lendi á meira en 65 m dýpi, þ.e. í botnlagi en restin dreifist um vatnsbolinn eða falli á hlíðar undir og við eldiskvíar. Áhrif eldisins voru skoðuð í líkaninu m.t.t. breytinga á styrk næringarefna í vatnssúlunni, breytingum á magni plöntusvifs, og breytingum á styrk súrefnis, sérstaklega í botnlagi fjarðarins

Tafla 2. Losun næringarefna og kolefnis miðað við fóðurmagn, skv. Wang o.fl. (2012), og áætluð árleg losun við þriggja kynslóða 14.500 tonna eldi í Arnarfirði eins og áformað er af Arnarlax (Verkís, 2019).

Table 2: Release of nutrients and carbon, relative to amount of food, according to Wang et.al (2012), and, as an example, total annual release for 14.500 tons three-generation salmon farming operations as proposed by Arnarlax (Verkís, 2019).

Stuðull		Losun á ári miðað við 14.500 tonna 3ja kynslóða eldi
Fóðurmagn		17.110 tonn ár ⁻¹
Losun í uppleystu formi		
Köfnunarefni í uppleystu formi	Fóðurmagn x 0,9 x 0,065 x 0,48	480 tonn ár ⁻¹
Fosfór í uppleystu formi	Fóðurmagn x 0,9 x 0,010 x 0,21	32 tonn ár ⁻¹
Losun í föstu formi		
Kolefni í föstu formi	Fóðurmagn x 0,9 x 0,510 x 0,19	1.492 tonn ár ⁻¹
Köfnunarefni í föstu formi	Fóðurmagn x 0,9 x 0,065 x 0,15	150 tonn ár ⁻¹
Fosfór í föstu formi	Fóðurmagn x 0,9 x 0,010 x 0,44	68 tonn ár ⁻¹
Súrefnisþörf		
Öndun fiska	-1x Fóðurmagn x0,9 x0,510 x0,40 x c	-2,62 * 10 ⁸ mol O ₂ ár ⁻¹
Niðurbrot kolefnis í föstu formi	-1x Fóðurmagn x0,9 x0,510 x0,19 x c	-1,24 * 10 ⁸ mol O ₂ ár ⁻¹
Skýringar		
Reiknistuðull fyrir súrefni	c = 10 ⁶ /12 mol O ₂ / tonn ⁻¹	
Dæmið miðast við 14.500 tonna eldi og fóðurstuðull 1,18. Heildarmagn fóðurs er 17.110 tonn.		
Við þriggja kynslóða eldi er árlegt fóðurmagn einnig um 17.110 tonn.		

Niðurstöður

Það mat á álagi frá fiskeldi sem leiðir til ráðgjafar um burðarþol fjarða byggir á mati á losun efna í uppleystu og föstu formi. Bæði uppleyst og föst efni sem frá fiskeldi koma geta haft áhrif á líffræðilegu gæðabættina sem notaðir eru til að meta ástand fjarða og annarra strandsjávarvatnshlota. Uppleystu efnin þynnast og berast með straumum frá eldissvæðum en fasta efnið lendir á botni undir og við kvíar. Sú viðbót af köfnunarefni og fosfór sem þarna berst til fjarðarins getur aukið þörungavöxt og niðurbrot lífrænna efna eykur súrefnisupptöku í botnlagi fjarðarins. Þessir þættir voru skoðaðir með ACExR/LESV líkaninu sem einn liður í að meta burðarþol fjarðarins. Við mat á áhrifum eldis af ákveðinni stærð var ætíð miðað við það ár í eldisferlinu þegar álag af völdum fóðrunar er mest.

Ástand sjávar samkvæmt líkaninu

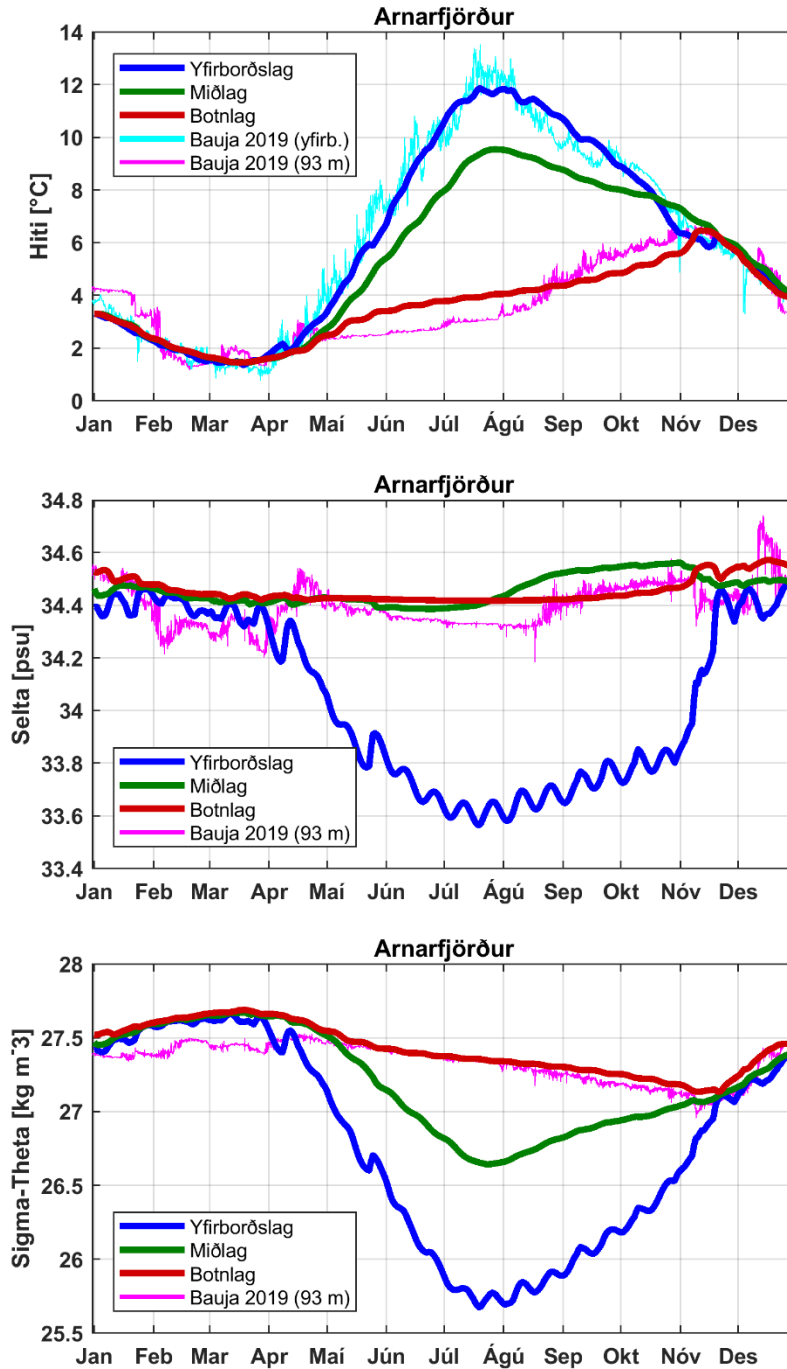
Eðlisfræðilíkanið ACExR var stillt þannig að það líkti eftir helstu einkennum sjávar í Arnarfirði í samræmi við mælingar, sérstaklega með tilliti til hitastigs við yfirborð og botn, hlýnunar botnlags á sumrin, og dagsetningu vetrarblöndunar í nóvember.

3. mynd sýnir hita, seltu og eðlisþyngd í þriggja laga líkaninu, auk mælinga frá árinu 2019. Tekið skal fram að við burðarþolsmat Arnarfjarðar (Hafrannsóknastofnun, 2022a) var byggt á svipuðum mælingum frá árinu 2014, en mælingar frá 2019 eru samfelldar yfir heilt ár, bæði við yfirborð og við botn, og því valdar til samanburðar við líkanið hér. Hitabreytingar í miðlaginu fara yfirleitt saman við hitabreytingar í strandsjó, þar sem innstreymi strandsjávar fer að mestu leyti í miðlag líkansins en það stýrist af eðlismassa.

Yfirborðslag líkansins er með minni seltu vegna ferskvatnsflæðis frá landi. Það hlýnar á sumrin vegna sólargeislunar en auk þess hefur blöndun milli laga vegna sjávarfallastrauma og vinds áhrif á yfirborðslagið.

Botnlagið í líkaninu er einangrað yfir sumarmánuðina (maí – október), en það hlýnar jafnt og þétt, um $0,2\text{ }^{\circ}\text{C mánuð}^{-1}$, vegna blöndunar (iðustreymis) frá miðlagi niður í botnlag. Þetta iðustreymi er um $120\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$ í líkaninu að sumarlagi og því af sömu stærðargráðu og metið er út frá mælingum. Í nóvember endurnýjast botnlag í líkaninu að fullu þegar eðlisþyngd strandsjávar er nógu há til að innstreymið fari niður í botnlagið, og á veturna er blöndunin milli laga mikil.

Í samanburði við mælingar í Arnarfirði er líkanið að líkja ágætlega eftir aðstæðum. Þó mælingar sýni minni blöndun við botnlagið í upphafi sumars og meiri hlýnun í ágúst – september 2019, er meðalhlýnun í líkaninu og upphaf vetrarblöndunar í nóvember í samræmi við raunmælingar.



3. mynd. Niðurstöður úr ACExR líkaninu og ástand sjávar í Arnarfirði. Efst: hiti (°C), miðja: selta, neðst: eðlisþyngd ($\text{kg m}^{-3} - 1000$). Litir einkenna lögin í líkaninu, þ.e. yfirborðslag með bláum línunum, miðlag grænar línur og botnlag rauðar línur. Mæligögn Arnarfjarðarbauja frá árinu 2019 má sjá í ljósbláum lit (hiti við yfirborð), og fjólubláum línunum (hiti, selta og eðlisþyngd við botn).

Figure 3: ACExR model of hydrographic conditions in Arnarfjörður. Temperature (°C) shown in top panel, salinity in middle panel, and density ($\text{kg m}^{-3} - 1000$) in the bottom panel. Line colors indicate model layers, with surface layer in blue, middle layer in green, and bottom layer in red. Observations of the Arnarfjörður buoy in 2019 shown in cyan (surface temperature), and magenta (bottom temperature, salinity, and density).

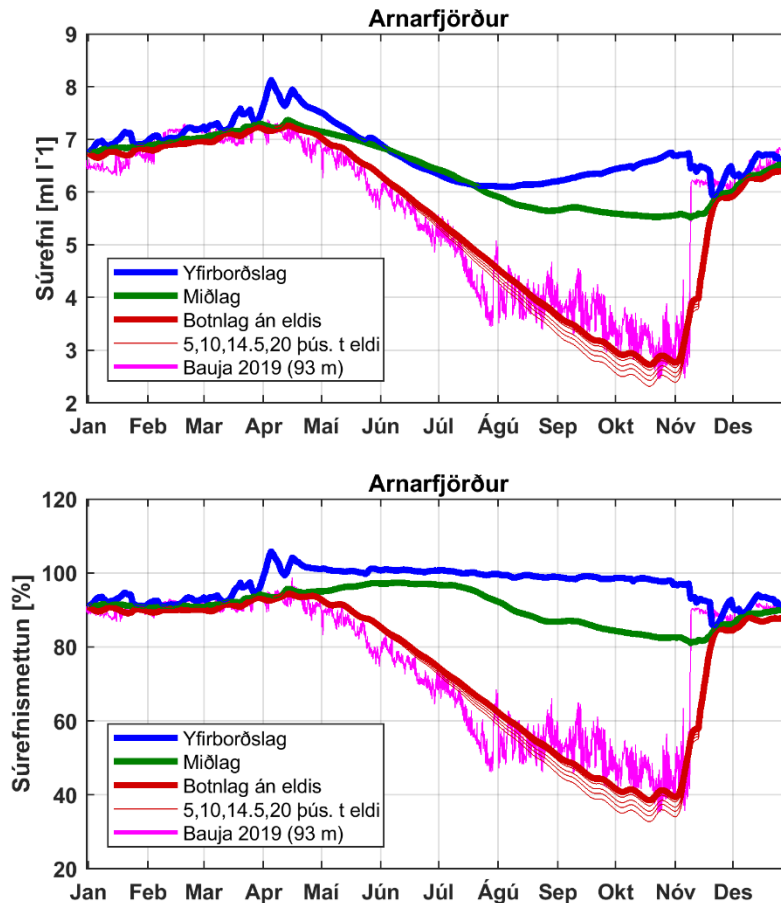
Vistfræðilegir þættir samkvæmt líkaninu

Í vistfræðilíkaninu LESV er styrkur næringarefna og súrefnis reiknaður, og líkanið ákvarðar breytingar yfir árið á styrk þessara efna út frá vexti þörungagróðurs, náttúrulegu kolefnisflæði og súrefnisþörf við niðurbrot lífrænna efna.

Náttúrulegt kolefnisflæði er einn helsti áhrifaþáttur á súrefnisstyrk í botnlaginu. Líkanið gerir ráð fyrir að kolefnisflæði sé stöðugt yfir allt árið, og að lífrænt efni sé brotið niður strax, þ.e. engin uppsöfnun á botni. Líkanakeyrslur fyrir Arnarfjörð sýndu að náttúrulegt kolefnisflæði hefur mikil áhrif á súrefnisstyrk í botnlagi. Þegar kolefnisflæði var stillt upp á ákomu $8,8 \text{ g C m}^{-2} \text{ mánuð}^{-1}$ eða um $106 \text{ g C m}^{-2} \text{ ár}^{-1}$ reyndist líkanið herma lækkun súrefnis í botnlagi í samræmi við mælingar (4. mynd). Gildið er af sömu stærðargráðu og raunmælingar á kolefnisflæði með setgildrum ($60 - 120 \text{ g C m}^{-2} \text{ ár}^{-1}$, Sólveig Ólafsdóttir o.fl., 2015). Heildarmagn náttúrulegs kolefnis sem berst í Arnarfjörð í líkaninu er því um 29.000 tonn C ár^{-1} en rúmlega helmingur þess, 15.000 tonn C ár^{-1} , lendir í botnlaginu.

Niðurstöður úr líkaninu sýna að súrefnisstyrkur í botnlagi (þykk rauð lína á 4. mynd) lækkar yfir sumarmánuðina, frá $7,2 \text{ mL L}^{-1}$ í apríl niður í $2,8 \text{ mL L}^{-1}$ í lok október. Meðallækkun á mánuði er um $-0,85 \text{ mL L}^{-1}$, bæði samkvæmt útreikningum gerðum með líkaninu og samkvæmt mælingum (Andreas Macrander o.fl., 2021). Í nóvember hækkar súrefnisstyrkur ört með endurnýjun botnlagsins og er um $6 - 7 \text{ mL L}^{-1}$ (90 % mettun) á veturna. Þessar niðurstöður benda til að líklegt sé að líkanið nái að líkja vel eftir náttúrulegum breytingum á súrefnisstyrk í botnlaginu, þó skammtímasveiflur í mælingum séu meiri.

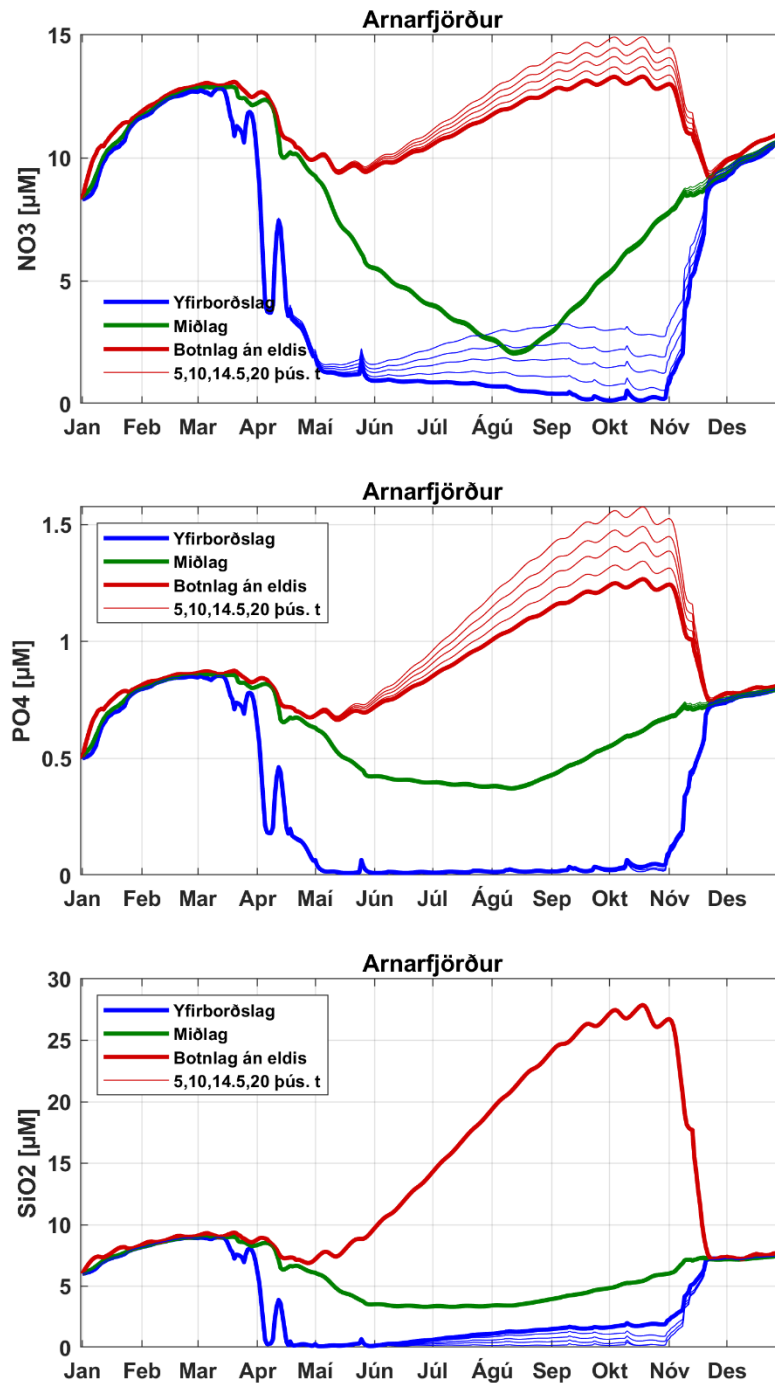
Í efri lögum fjarðarins er súrefnismettun um eða yfir 90 % á öllum árstímum (4. mynd) samkvæmt niðurstöðum líkansins. Yfirmettun sést í yfirborðslagi á vorin, í samræmi við athuganir frá þeim árstíma (Andreas Macrander o.fl., 2021) þegar vorblómi plöntusvifs á sér stað.



4. mynd. Niðurstöður úr LESV líkaninu: Súrefnisstyrkur í Arnarfirði. Efri mynd: súrefnisstyrkur (mL L^{-1}), neðri mynd súrefnismettun (%). Litir einkenna lögin í líkaninu, þ.e. yfirborðslag með bláum línunum, miðlag grænar línur og botnlag rauðar línur. Þykka rauða línan sýnir súrefnisstyrk í botnlagi án fiskeldis, en mjóar rauðar línur sýna súrefni við 5.000, 10.000, 14.500 og 20.000 tonna fiskeldi, miðað við að helmingur fasts úrgangs lendi í botnlagi. Mælingar á súrefni við botn árið 2019 sýnt með fjólubláum lit.

Figure 4: LESV model: Dissolved oxygen in Arnarfjörður. The top panel shows concentrations (mL L^{-1}), the bottom panel saturation (%). Line colors indicate model layers, with surface layer in blue, middle layer in green, and bottom layer in red. The heavy red line shows oxygen levels in the bottom layer without fish farming, and light lines indicate oxygen concentration with 5,000, 10,000, 14,500, and 20,000 tons of fish farming, respectively, assuming that 50 % of solid wastes end up in the bottom layer. Dissolved oxygen at the bottom observed at the in 2019 shown in magenta.

Styrkur köfnunarefnis, fosfórs og kísils í líkaninu breytist með árstíma. Í útreikningum fyrir Arnarfjörð án fiskeldis (þykkar línur á 5. mynd) gerir líkanið ráð fyrir að næringarefnin séu jafndreifð eftir dýpi um allan fjörðinn á veturna, en eftir apríl og fram á haust verði mikil lækkun á styrknum í yfirborðslaginu. Lækkunin á styrk næringarefna í yfirborði stafar af vexti plöntusvifs, en vorblómi plöntusvifs kemur vel fram í heildarmagni blaðgrænu í líkaninu (þykkar línur á 6. mynd). Hins vegar eykst styrkur næringarefna í botnlagi þegar líður á haustið, sem má útskýra með niðurbroti lífræna efna við botninn. Reiknaðar árstímabreytingar þörungavaxtar í líkaninu má telja raunhæfar þó náttúrulegar aðstæður séu breytilegri en líkanið getur lýst.



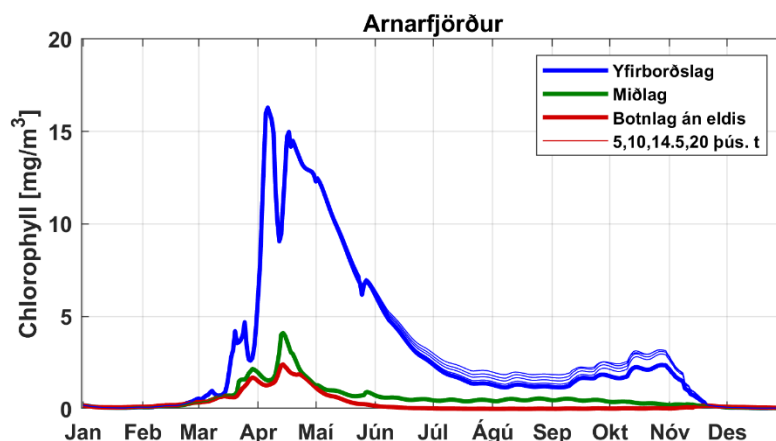
5. mynd. LESV líkanið: Styrkur næringarefna í Arnarfirði. Efst: köfnunarefni (μM), miðja: fosfór (μM), neðst: kísill (μM). Litir einkenna lögin í líkaninu, þ.e. yfirborðslag með bláum línur, miðlag grænar línur og botnlag rauðar línur. Þykkar línur sýna styrk án fiskeldis, en finar línur tákna styrk við 5.000, 10.000, 14.500 og 20.000 tonna fiskeldi.

Figure 5: LESV model: Nutrients in Arnarfjörður. Top panel: Nitrogen (μM), middle: Phosphate (μM), bottom: Silicate (μM). Line colors indicate model layers, with surface layer in blue, middle layer in green, and bottom layer in red. Heavy lines show concentrations without fish farming, and light lines indicate concentrations with 5,000, 10,000, 14,500, and 20,000 tons of fish farming, respectively.

Áhrif álags frá fiskeldi samkvæmt líkaninu

Niðurstöður líkansins (4. mynd) sýna að súrefnisstyrkur í botnlagi Arnarfjarðar að hausti lækkar nokkuð línulega með umfangi fiskeldis, eða um $-0,1 \text{ mL L}^{-1}$ á hver 5.000 tonn í eldi, miðað við að helmingur fasts úrgangs lendi í botnlagi. Við 14.500 tonna fiskeldi og 17.000 tonna fóðurnotkun á ári skv. eldisáætlun Arnarlax (Verkís, 2019) er lágmarksstyrkur súrefnis í botnlagi um $0,3 \text{ mL L}^{-1}$ lægri en án fiskeldis. Lágmarksgildi er um $2,8 \text{ mL L}^{-1}$ án fiskeldis (39 % mettnun), en um $2,5 \text{ mL L}^{-1}$ (35 % mettnun) með 14.500 tonna eldi í stuttan tíma að hausti. Ef fiskeldi eykst í allt að 20.000 tonn má gera ráð að súrefnisstyrkur í botnlagi lækki um allt að $0,4 \text{ mL L}^{-1}$, og lágmarksgildin yrðu um $2,4 \text{ mL L}^{-1}$ (33 % mettnun) í stuttan tíma að hausti. Lækkun súrefnisstyrks yrði hlutfallslega meiri ef meira en helmingur úrgangs lendir í botnlagi.

Líkanið sýnir einnig breytingu á styrk næringarefna (5. mynd). Mestu breytingarnar eru í botnlaginu á þeim tíma sem það er einangrað, þar sem styrkur köfnunarefnis og fosfórs eykst með umfangi fiskeldisins. Engar breytingar sjást hins vegar á styrk kísils þar sem nánast enginn kísill losnar við eldi. Litlar sem engar breytingar sjást í miðlaginu (um 20 – 66 m dýpi), sem er í sífelldum vatnsskiptum við strandsjó. Hins vegar er mesta losun uppleystra efna í yfirborðslaginu (um 0 – 20 m dýpi), og eykst styrkur köfnunarefnis við yfirborð þegar líður á sumarið. Líkanið gerir ráð fyrir að aukið framboð af næringarefnum valdi auknum vexti plöntusvifs (6. mynd), sérstaklega síðsumars þegar náttúrulegt framboð næringarefna er lítið.



6. mynd. LESV líkanið: Plöntusvif í Arnarfirði, metið sem blaðgræna í mg m^{-3} . Mynd sýnir heildarstyrk blaðgrænu í líkaninu, en litir einkenna lögin, þ.e. yfirborðslag með bláum línunum, miðlag grænt og botnlag rautt. Þykkar línur sýna magn þörunga án fiskeldis, en fínar línur tákna magn við 5.000, 10.000, 14.500 og 20.000 tonna fiskeldi.

Figure 6: LESV model: Phytoplankton in Arnarfjörður, given as chlorophyll concentration in mg m^{-3} . The figure shows total chlorophyll concentration in the model. Line colors indicate model layers, with surface layer in blue, middle layer in green, and bottom layer in red. Heavy lines show concentrations without fish farming, and light lines indicate concentrations with 5,000, 10,000, 14,500, and 20,000 tons of fish farming, respectively.

Umræður

Við mat á burðarþoli fjarða og hafsvæða skal einungis athugað það álag af völdum sjókvíaeldis sem stafar af losun lífræns efnis samkvæmt skilgreiningunni á burðarþoli í lögum um fiskeldi. Það álag er einkum losun uppleystra efna í efri lögum, og losun fastra efna í botnlag. Hér er fjallað um helstu þætti sem teknir voru til greina og skiptu máli við mat á burðarþoli Arnarfjarðar.

1) Heildaráhrif losunar efna frá eldi

Við mat á umhverfisáhrifum sjókvíaeldis hefur verið gert ráð fyrir að losun og afdrif efna sé í samræmi við Wang o.fl. (2012) þar sem gert er ráð fyrir að losun uppleystra og fastra efna sé á ákveðnu hlutfalli við magn þess fóðurs sem notað er í eldinu. Svo er gert ráð fyrir að fóðurstuðull (þ.e. fóðurnotkun miðað við lífmassa fisks við slátrun) sé á bilinu 1,1 til 1,3 (sjá t.d. Arctic Sea Farm, 2018; Verkís, 2019). Þrátt fyrir að almennt sé miðað við niðurstöður úr Wang o.fl. (2012) er gert ráð fyrir að bæði magn og samsetning úrgangs frá eldiskvíum sé að einhverju leyti breytilegt (Price o.fl., 2015). Niðurstöður úr líkaninu fyrir eðlis- og efnafræðilega þætti voru yfirleitt í samræmi við mælingar í Arnarfirði, m.a. varðandi lagskiptingu á sumrin, lækkun súrefnisstyrks í botnlagi á sumrin og að haustlagi, og endurnýjun á botnlagi í nóvember. Arnarfjörður er dæmigerður þröskuldsfjörður með einangrað botnlag að sumar- og haustlagi, og má því telja þriggja laga boxlíkan raunhæfa nálgun í að líkja eftir náttúrulegu ástandi sjávar í firðinum.

Niðurstöður úr líkansútreikningum benda til að áhrif fiskeldis á fjörðinn í heild aukist hlutfallslega með aukinni losun efna, fóðurnotkun og nýtingu þess, sem hafa því bein áhrif á útkomuna í líkaninu. Hins vegar benda niðurstöður líkansins til að það skipti minna máli hvort efnalosun dreifist jafnt yfir allt árið eða sé mismunandi eftir árstíma. Þá gerir líkanið ráð fyrir því að næringarefni og kolefni frá eldinu dreifist jafnt um allan fjörðinn óháð staðsetningu eldiskvíá, innan viðkomandi dýptarlaga (yfirborðs-, mið- eða botnlag).

Samt þarf að hafa í huga að raunástand og breytileiki þess er flóknara en einfalt boxlíkan ræður við. Boxlíkan getur ekki hermt eftir staðbundnu álagi heldur spáir meðalálagi á allan fjörðinn. Þættir eins og straumkerfi með aðskildu innstreymi og útstreymi „hægra megin“ koma ekki fram í boxlíkaninu, og vistkerfið í líkaninu er mjög einfalt. Þá gerir líkanið ráð fyrir því að lífræn efni sem berast niður á botn, brotni strax niður og á það bæði við náttúrulegt flæði þeirra sem og þann úrgang sem berst frá fiskeldiskvíum. Líkanið gefur því ekki vísbendingar um endurnýjunartíma botns undir kvíum. Sá endurnýjunartími kann að vera mismunandi milli eldissvæða og hvíldartími þyrfti að taka mið af raunástandi undir kvíum.

2) Áhrif losunar uppleystra efna

Næringarefnin á uppleystu formi losna mest í efri lögum og geta því ýtt undir þörungavöxt. Niðurstöður líkansins sýna jafnframt að bein súrefnisupptaka vegna öndunar eldisfiska hafi engin teljandi áhrif, þar sem súrefnisflæði frá andrúmslofti yfirgnæfir þá upptöku.

Þó svo að aðferð líkansins að dreifa næringarefnum jafnt um allan fjörðinn megi telja sem talsverða einföldun þess sem er raunverulegt, má gera ráð fyrir að uppleystu efnin dreifist samt sem áður um stórt svæði, enda eru straumar mjög breytilegir vegna vinda og sjávarfalla eins og mælingar í Arnarfirði sýna. Það má því telja að áhrif losunar uppleystra efna séu að öllu jöfnu ekki mikil því vatnsskiptin í efri lögum eru almennt mikil. Almennt má þó gera ráð fyrir að það sé betra að staðsetja eldiskvíar heldur utarlega í firðinum, þar sem straumhraði og vatnsskipti eru yfirleitt meiri en innanlega í fjarðarbotninum eða í innfjörðum hans.

3) Áhrif úrgangs í föstu formi

Lífrænn úrgangur í föstu formi er losaður á hafsbotninn, aðallega undir og í grennd við eldiskvíar. Telja má að úrgangurinn hafi talsverð staðbundin áhrif á vistkerfi hafsbotnsins á þessu svæði. Líkanaútreikningar í Arnarfirði benda til þess að umhverfisáhrif úrgangs á föstu formi fari mikið eftir botndýpi undir kvíunum. Við niðurbrot fasts úrgangs á minna en 65 m dýpi er súrefni nýtt úr miðlaginu þar sem vatnsskiptin eru almennt mikil. Ef úrgangur lendir hins vegar á meira en 65 m dýpi, er súrefni tekið úr botnlagi, sem er einangrað að mestu leyti yfir sumar- og haustmánuðina. Við líkanaútreikninga var gert ráð fyrir að helmingur úrgangsins lendi í botnlaginu og niðurstöður eru, að þá nemur lækkun súrefnisstyrks í október um $0,3 \text{ mL L}^{-1}$ við 14.500 tonna eldi og $0,4 \text{ mL L}^{-1}$ við 20.000 tonna eldi.

Lækkun súrefnisstyrks í botnlagi Arnarfjarðar vegna álags frá sjókvíaeldi er þó minni en náttúrulegur breytileiki hans milli ára (sjá Andreas Macrander o.fl., 2021, fyrir mælingar 2013 – 2021) og því er ekki hægt að sjá áhrif fiskeldisins í mæligögnum frá Arnarfirði undanfarin ár, þó fóðurmagnið væri komið upp í allt að 12.252 tonnum árið 2018 (Verkís, 2019). Ástæða þess er að súrefnisstyrkur í botnlagi Arnarfjarðar ræðst að mestu leyti af náttúrulegu kolefnisflæði í botnlag sem er metið um 15.000 tonn kolefnis á ári, en kolefnisflæði frá föstum úrgangi miðað við 14.500 tonna fiskeldi er talsvert minna, eða um 1.500 tonn kolefnis á ári sem er um 10 % af náttúrulegu flæði kolefnis í firðinum. Við burðarþolsmat er miðað við að ekki yrði lækkun á styrk súrefnis umfram náttúrulegan breytileika í styrk þess.

Mælingar sýna að botnlagið í Arnarfirði er einn samfelldur vatnsmassi og lækkun súrefnis í botnlagi út af niðurbroti lífrænna efna er eins um allan fjörðinn. Þetta gerist þrátt fyrir að fastur úrgangur dreifist að mestu leyti í grennd við eldiskvíar og staðbundið álag á vistkerfi á botni er nálægt kvíum. Lækkun súrefnis í botnlagi eykst eftir því sem meira af úrgangi lendir á dýpi sem

er meira 65 m. Þar sem endurnýjun botnlags í Arnarfirði er takmörkuð er talið heppilegra að staðsetja kvíar á grynri svæðum. Mjög aðdjúpt er í Arnarfirði og dýpi eykst hratt, en oft er ekki meira en 200 m á milli 30 og 60 m dýptarlína (1. mynd) svo að lítið pláss er fyrir fiskeldi á því dýptarbili. Þá þarf að hafa í huga að sterkir straumar (meðalstraumhraði meiri en $3,5 \text{ cm s}^{-1}$, Stigebrandt 2011) dreifa úrganginum á stærra svæði, og fastur úrgangur sem lendir á hallandi botni getur skriðið niður í botnlag þó dýpi undir kvíunum sem úrgangurinn kemur frá sé minna. Straummælingar sýna að straumhraði við botn í Arnarfirði getur verið meiri en $3,5 \text{ cm s}^{-1}$ (Andreas Macrander o.fl., 2021) og að straumstefna getur verið breytileg svo að úrgangur gæti dreifst nokkuð út fyrir kvíastæðin.

Botnlægir hryggleysingar (botndýr) eru einn af þeim vistfræðilegu gæðapáttum sem lýsa vistfræðilegur ástandi strandsjávarvatnshlota (Sólveig Rósa Ólafsdóttir o. fl., 2019; Pamela Woods o.fl., 2021; Rakel Guðmundsdóttir o.fl., 2022). Ástandið er metið bæði með tegundasamsetningu og fjölda þeirra (Pamela Woods o.fl., 2021). Endurnýjun botndýrasamfélaga eftir hverja eldislotu getur verið mishröð eftir aðstæðum á hverjum stað og hvíldartími milli eldislota þyrfti að taka mið af því. Þá þarf einnig að hafa í huga hve stór hluti af botni hvers vatnshlots verður fyrir marktækum áhrifum af starfsemi þegar ástand þeirra er metið samkvæmt þeim mælikvörðum sem settir eru fram í lögum um stjórn vatnamála.

Samantekt

Áhrif fiskeldis á vatnsgæði í Arnarfirði voru metin með þriggja laga boxlíkani, ACExR/LESV sem hefur verið aðlagð að aðstæðum í firðinum. Telja má að líkanið hermi vel ástand sjávar í samræmi við mælingar, þ.m.t. einangrað botnlag, blöndun og endurnýjun sjávar. Líkanaútreikningar benda til þess að losun uppleystra efna frá fiskeldi hafi frekar lítil áhrif, en að takmarkandi þáttur á burðarþoli Arnarfjarðar m.t.t. fiskeldis er lækkun súrefnis í botnlagi vegna niðurbrots fasts úrgangs við botn, sem og staðbundin áhrif á botn við eldiskvíar. Botnlag í Arnarfirði er einangrað að mestu leyti yfir sumar- og haustmánuðina og fer súrefnisstyrkur lækkandi á 2,4 – 4,0 mL L⁻¹ (30 – 60 % mettun) síðla hausts við náttúrulegt ástand. Við 14.500 tonna þriggja kynslóða eldi má gera ráð fyrir að súrefnisstyrkur í botnlagi verði allt að 0,3 mL L⁻¹ lægri að haustlagi, miðað við að helmingur fasts úrgangs lendi í botnlagi. Burðarþolsmatið tekur mið af náttúrulegum breytingum og óvissuþáttum og byggist matið á þeim forsendum að ástand sjávar og vistkerfa í firðinum verði ekki fyrir marktækum neikvæðum breytingum.

Þakkarorð

Verkefnið Burðarþol íslenskra fjarða er styrkt úr Umhverfissjóði sjókvíaeldis og þökkum við fyrir stuðninginn. Við þökkum Rakel Guðmundsdóttur, Hrönn Egilsdóttur, Kristínu J. Valsdóttur og Guðmundi J. Óskarssyni fyrir yfirllestur á handritinu.

Heimildir

Agnes Eydal, Sólveig Rósa Ólafsdóttir, Steinunn Hilma Ólafsdóttir, Kristinn Guðmundsson og Karl Gunnarsson. (2014). *Drög að vistfræðilegri ástandsflökkun strandsjávarvatnshlota. Stöðuskýrsla til Umhverfisstofnunar*, Hafrannsóknastofnun, 2014.

Andreas Macrander, Sólveig R. Ólafsdóttir, Magnús Danielsen, Hjalti Karlsson, Arnþór Bragi Kristjánsson og Jacek Sliwinski. (2021). *Arnarfjörður: Ástand sjávar, straumar og endurnýjun botnlags*. Hafrannsóknastofnun, Haf- og vatnarannsóknir, HV 2021-38.

Anon. (2017). Hafrannsóknastofnun, firðir og grunnsævi. Sótt af <https://www.hafogvatn.is/is/rannsoknir/fjardarannsoknir/vestfirdir/arnarfjordur> (Skoðað 17.11.2020).

Arctic Sea Farm. (2018). *Framleiðsla á 4.000 tonnum af laxi í kynslóðaskiptu eldi í Arnarfirði. Mat á umhverfisáhrifum – frummatsskýrsla*.

Cromey, Chris & Nickell, Thomas & Black, Kenneth. (2002). DEPOMOD – modeling the deposition and biological effects of waste solids from marine cage farms. *Aquaculture*. 214. 211-239. 10.1016/S0044-8486(02)00368-X.

Hafrannsóknastofnun. (2022a). *Mat á burðarþoli Arnarfjarðar m.t.t. sjókvíaeldis*. Hafrannsóknastofnun, ráðgjöf, endurútfærð 2022.

Hafrannsóknastofnun. (2022b). *Mat á burðarþoli Fáskrúðsfjarðar m.t.t. sjókvíaeldis*. Hafrannsóknastofnun, ráðgjöf, endurútfærð 2022.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J. and Zhu, Y. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American meteorological Society*, 77(3), pp.437-472.

Pamela J Woods, Steinunn Hilma Ólafsdóttir og Rakel Guðmundsdóttir. (2021) *Exploration of Benthic Invertebrate Diversity Indices and Ecological Quality Ratios for defining ecological status of coastal marine waters according to the Water Framework Directive (2000/60/EC)*. Hafrannsóknastofnun. Haf- og vatnarannsóknir, HV 2021-05.

Price, Carol & Black, Kenneth & Hargrave, Barry & Morris, James. (2015). Marine cage culture and the environment: Effects on water quality and primary production. *Aquaculture Environment Interactions*. 6. 151-174. 10.3354/aei00122.

Rakel Guðmundsdóttir, Sólveig R. Ólafsdóttir, Steinunn Hilma Ólafsdóttir, Pamela J. Woods, Lilja Gunnarsdóttir, Karl Gunnarsson, Kristinn Guðmundsson og Eydis Salóme Eiríksdóttir. (2022) *Vistfræðileg viðmið við ástandsflökkun strandsjávar*. Hafrannsóknastofnun. Haf- og vatnarannsóknir, HV 2022-39.

Sólveig R. Ólafsdóttir, Magnús Danielsen, Alice Benoit-Cattin, Jacek Sliwinski og Andreas Macrander. (2020). *Ástand sjávar 2017 og 2018*. Hafrannsóknastofnun. Haf- og vatnarannsóknir, HV 2020-40.

Sólveig R. Ólafsdóttir, Magnús Danielsen og Alice Benoit-Cattin, 2017. *Endurnýjun næringarefna nærri botni í Arnarfirði og Ísafjarðardjúpi*. Hafrannsóknastofnun. Haf- og vatnarannsóknir, HV 2017-035.

Sólveig Rósa Ólafsdóttir, Agnes Eydal, Steinunn Hilma Ólafsdóttir, Kristinn Guðmundsson og Karl Gunnarsson, (2019). *Gæðapættir og viðmiðunaraðstæður strandsjávarvatnshlota*. Hafrannsóknastofnun. Haf- og vatnarannsóknir, HV 2019-53.

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*. Fjölrit Hafrannsóknastofnunarinnar. 2015;181.

Steingrímur Jónsson. (2006). *Straumar og sjór í Arnarfirði*. Hafrannsóknastofnun og Háskóli á Akureyri (óbirt skýrsla).

Stigebrandt, Anders. (2001). FjordEnv – a water quality model for fjords and other inshore waters. 10.13140/RG.2.1.4846.5127.

Tett, Paul & Portilla, Enrique & Gillibrand, Philip & Inall, Mark. (2011). Carrying and assimilative capacities: The ACExR-LESV model for sea-loch aquaculture. *Aquaculture Research*. 42. 51 - 67. 10.1111/j.1365-2109.2010.02729.x.

Verkís. (2019). *Laxeldi Arnarlax í Arnarfirði: Auking framleiðslu um 4.500 tonn*. Tillaga að matsáætlun (drög).

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