
Hafrannsóknir nr. 164

Vistkerfi Íslandshafs
The Iceland Sea Ecosystem Project

Reykjavík 2012

Þetta rit er tileinkað minningu Dr. Hjálmars Vilhjálmssonar (1937-2011). Rannsóknir Hjálmars beindust fyrst og fremst að lífsháttum og stofnsveiflum loðnu, allt frá upphafi loðnuveiða hér við land, og var hann brautryðandi á því sviði. Hjálmar var helsti hvatamaður þess að ráðist var í þetta verkefni um vistkerfi Íslandshafs og áhrif umhverfisbreytinga á loðnustofninn.

This report is dedicated to the memory of Hjálmar Vilhjálmsson, PhD (1937-2011). Hjálmar started his pioneering work on the life-history and stock assessments of capelin in the 1960s, and centred his scientific work on this field ever since. Hjálmar was the main instigator of the Iceland Sea Ecosystem Project and the effects of ecological changes on the capelin population.

Efnisyfirlit*Contents*

Ólafur K. Pálsson o.fl: Leiðangrar og gagnasöfnun í Íslandshafi 2006–2008 / <i>Surveys and data collection in the Iceland Sea Ecosystem Project 2006-2008</i>	5
Héðinn Valdimarsson og Steingrímur Jónsson: Ástand sjávar og straumar í Íslandshafi / <i>Hydrographic conditions and currents in the Iceland Sea</i>	14
Sólveig R. Ólafsdóttir: Svæðatengdur styrkur og nýting næringarefna í Íslandshafi / <i>Regional distribution and uptake of nutrients in the Iceland Sea</i>	30
Hafsteinn G. Guðfinnsson: Breytingar á blaðgrænumagni, frumframleiðni og tegunda-samsetningu svifþörungna í Íslandshafi / <i>Changes in chlorophyll a, primary production and species composition in the Iceland Sea</i>	45
Ástþór Gíslason og Teresa Silva: Útbreiðsla og árstíðabreytingar dýrasvifs í Íslandshafi / <i>Abundance, composition and development of zooplankton in the subarctic Iceland Sea</i>	67
Hildur Pétursdóttir: Fæðuvistfræðileg tengsl algengra uppsjávartegunda í Íslandshafi / <i>Trophic relationships of abundant pelagic species in the Iceland Sea</i>	88
Björn Gunnarsson og Konráð Þórisson: Uppruni og rek loðnulirfa / <i>The origin and drift route of capelin larvae</i>	103
Ólafur K. Pálsson, Sveinn Sveinbjörnsson, Héðinn Valdimarsson, Ástþór Gíslason og Hjálmar Vilhjálmsson: Lífshættir loðnu í Íslandshafi / <i>Capelin life-history traits in the Iceland Sea</i>	119
Baldvin Einarsson, Alethea Barbaro, Björn Birnir og Sven Sigurðsson: Líkön og herm-anir af göngum, vexti og kynþroska loðnu / <i>Modelling and simulations of the migration, growth and maturity of capelin</i>	133

Leiðangrar og gagnasöfnun í Íslandshafi 2006-2008.

Ólafur K. Pálsson, Héðinn Valdimarsson, Sólveig R. Ólafsdóttir, Hafsteinn G. Guðfinnsson, Ástþór Gíslason, Hildur Pétursdóttir, Konráð Þórisson, Björn Gunnarsson, Sveinn Sveinbjörnsson, Agnar M. Sigurðsson, Agnes Eydal, Björn Sigurðarson, Friðrik Guðmundsson, Jón Ingvar Jónsson, Kristín Valsdóttir, Magnús Danielsen, Ragnhildur Guðmundsdóttir, Ragnhildur Ólafsdóttir, Stefán H. Brynjólfsson og Teresa Silva
Hafrannsóknastofnunin

Ágrip

Ólafur K. Pálsson, Héðinn Valdimarsson, Sólveig R. Ólafsdóttir, Hafsteinn Guðfinnsson, Ástþór Gíslason, Hildur Pétursdóttir, Konráð Þórisson, Björn Gunnarsson, Sveinn Sveinbjörnsson, Agnar M. Sigurðsson, Agnes Eydal, Björn Sigurðarson, Friðrik Guðmundsson, Jón Ingvar Jónsson, Kristín Valsdóttir, Magnús Danielsen, Ragnhildur Guðmundsdóttir, Ragnhildur Ólafsdóttir, Stefán H. Brynjólfsson og Teresa Silva 2012. *Leiðangrar og gagnasöfnun í Íslandshafi 2006-2008. Hafrannsóknir nr. 164.* Rannsóknir innan ramma verkefnisins "Vistkerfi Íslandshafs" hófust með gagnasöfnun í ársbyrjun 2006. Meginmarkmiðið var að rannsaka byggingu og gangverk vistkerfis Íslandshafs og nálægra hafsvæða, með sérstöku tilliti til lífsögu og afkomu loðnustofnsins. Gagnasöfnun fór fram í 10 rannsóknaleiðongrum og lauk haustið 2008. Úrvinnsla gagna hefur farið fram síðan og eru helstu niðurstöður kynntar í 9 greinum í þessu riti. Í þessari grein er helstu aðferðum við gagnasöfnun lýst og gerð grein fyrir heildarumfangi gagna sem aflað var í hverjum leiðangri. Þá eru leiðarlínur og stöðvataka einstakra leiðangra sýnd á kortum. Verkefnið Vistkerfi Íslandshafs er hluti af hinu alþjóðlega ESSAS verkefni (Ecosystem Studies of Sub-Arctic Seas).

Abstract

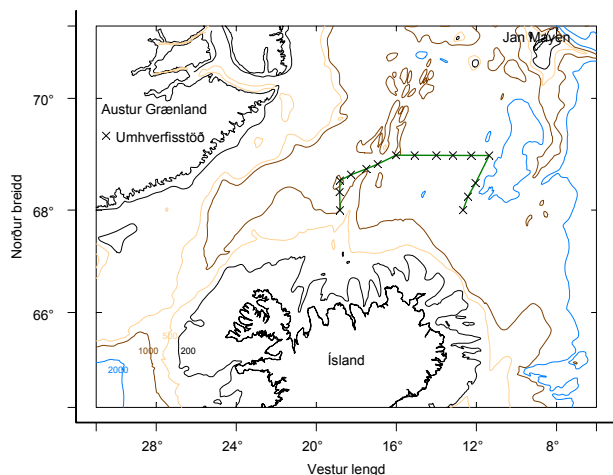
Ólafur K. Pálsson, Héðinn Valdimarsson, Sólveig R. Ólafsdóttir, Hafsteinn Guðfinnsson, Ástþór Gíslason, Hildur Pétursdóttir, Konráð Þórisson, Björn Gunnarsson, Sveinn Sveinbjörnsson, Agnar M. Sigurðsson, Agnes Eydal, Björn Sigurðarson, Friðrik Guðmundsson, Jón Ingvar Jónsson, Kristín Valsdóttir, Magnús Danielsen, Ragnhildur Guðmundsdóttir, Ragnhildur Ólafsdóttir, Stefán H. Brynjólfsson and Teresa Silva 2012. *Surveys and data collection in the Iceland Sea Ecosystem Project 2006-2008. Marine Research in Iceland no. 164.* The Iceland Sea Ecosystem Project was initiated in 2006. The main objective of the project was to analyze ecosystem structure and function in the Iceland Sea and adjacent waters, with particular reference to

capelin life history trends. Data collection was carried out in 10 research surveys during 2006-2008. The main results are presented in 9 articles in the present report. In this article methods of data collection are described and the amount of data collected in each survey presented. Furthermore, survey tracks and positions of stations are plotted for each survey. The Iceland Sea Ecosystem Project is affiliated to the international ESSAS project. (Ecosystem Studies of Sub-Arctic Seas).

Aðdragandi verkefnis

Frá lokum síðustu aldar hafa orðið breytingar í vistkerfi Íslandsmiða og nálægra hafsvæða, einkum varðandi aukið innstreymi Atlantssjávar og þar af leiðandi hlýnun sjávar. Sú tilgáta hefur verið sett fram að þessar breytingar hafi valdið veigamiklum tilfærslum í reki, útbreiðslu og uppvaxtarsvæðum unglöðnu sem og útbreiðslu, fæðu- og hrygningargöngum kynþroska loðnu, sem leitt hafi til vandkvæða við að mæla stærð loðnustofnsins og ákvarða aflamark hans (Hjálmar Vilhjálmsson 2002). Þetta hafi leitt til þess að loðna sé nú í minna mæli aðgengileg sem fæða fyrir þorsk og aðra fiskstofna og því hafi dregið mælanlega úr vexti þorsks. Þá hafi aðgengi loðnu til veiða minnkað mikið.

Þrátt fyrir umfangsmeiri rannsóknir á loðnustofninum en flestum öðrum fiskstofnum hér við land, er staða mála þannig, að við breyttar umhverfisaðstæður dugar fyrirleggjandi þekking skammt til að meta mikilvæga lífssögulega þætti eins og útbreiðslu og göngur loðnu eða leggja mat á ástand stofnsins í heild og þar með afrakstursgetu hans. Nokkuð augljóst má telja að þær vistfræðilegu breytingar sem átt hafa sér stað í hafinu umhverfis Ísland á síðustu 10-15 árum eða svo, hafi átt sinn þátt í umræddum breytingum á loðnustofninum. Ekki er þó unnt að líta fram hjá þeim möguleika að



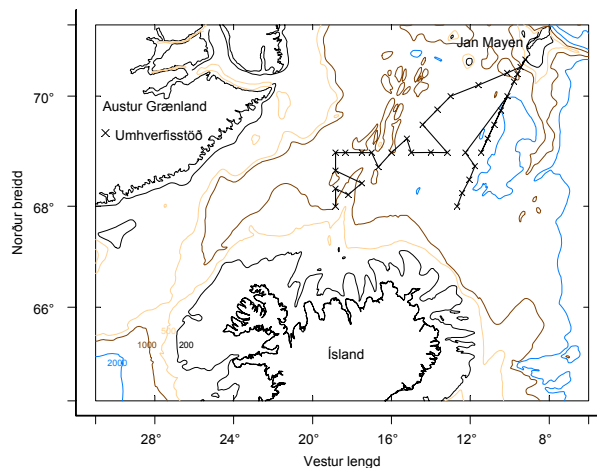
1. mynd. B2-2006. Umhverfisstöðvar í Íslandshafi 7.-10. febrúar 2006.

Figure 1. Environmental stations in the Iceland Sea 7-10 February 2006.

sjálfar veiðarnar hafi einnig átt þar hlut að máli með því að stuðla að umtalsverðri minnkun loðnustofnsins. Veiðarnar voru a.m.k. önnur aðalástæða lægðanna í loðnustofninum um og upp úr 1980 og 1989/90. Á hinn bóginn er engan veginn ljóst hvaða umhverfispættir, ólífrænar (haffræðilegir, t.d. hitastig sjávar) eða lífrænar (frumframleiðni, framboð fæðu), eigi hér helst hlut að máli. Þó má telja líklegt að sjávarhiti og lega hita- og straumskila ráði miklu um útbreiðslu og göngur, en framboð hæfilegrar fæðu á mismunandi þroskastigum loðnunnar sé ráðandi um lífslíkur og þar með nýliðun og stofnstærð.

Í ljósi þessara aðstæðna var, haustið 1999, fyrst viðruð hugmynd að rannsóknum á loðnu í Íslandshafi og hugsanlegum viðbrögðum hennar við þeim hlýindum og afleiddum umhverfisbreytingum sem orðnar voru þá þegar, og sterkar líkur bentu til að færu vaxandi og gætu orðið viðvarandi, a.m.k. næstu árin. Nauðsyn slíkra rannsókna var ítrekuð á næstu árum og náðu tillögur þar um loks fram að ganga haustið 2005 með fyrirbyggjandi verkefni og sérstöku fjárframlagi sjávarútvegsráðuneytisins til þess.

Markmið þessara vistkerfisrannsókna í Íslandshafi var að greina ferla lífvera, ólífrænna og lífrænna efna og orkuflutning, þar með taldir straumar og sjógerðir, í vistkerfi Íslandshafs og nálægra hafsvæða, í því skyni að fá betri skilning á byggingu og starfsemi eða gangverki vistkerfisins, með sérstöku tilliti til lífsferla og afkomu loðnustofnsins. Þetta felur í sér m.a. að afla upplýsinga um ástand sjávar, næringarefnabúskap sem og tegundasamsetningu, ársferla og



2. mynd. B4-2006. Umhverfisstöðvar í Íslandshafi 18.-26. maí 2006.

Figure 2. Environmental stations in the Iceland Sea 18-26 May 2006.

framleiðni svífsamfélaga, samspil þessara þátta og tengsl þeirra við afkomu loðnu.

Verkefnisstjórn var skipuð eftirtöldum sérfræðingum á Hafrannsóknastofnuninni: Ólafur K. Pálsson (verkefnisstjóri), Héðinn Valdimarsson (hafaðlisfræði), Sólveig R. Ólafsdóttir (hafefnafræði), Hafsteinn G. Guðfinnsson (svífpörungar), Ástþór Gíslason (dýrasvíf), Hildur Pétursdóttir (fæðukeðjur), Konráð Þórisson (loðnulirfur), Björn Gunnarsson (loðnulirfur) og Sveinn Sveinbjörnsson (loðna). Gagnasöfnun hófst í ársbyrjun 2006 og lauk árið 2008, sbr. nánari lýsingu í þessari grein.

Verkefnið Vistkerfi Íslandshafs er hluti af hinu alþjóðlega ESSAS verkefni (Ecosystem Studies of Sub-Arctic Seas). Markmið verkefna innan ESSAS er að skýra áhrif loftslagsbreytinga á vistkerfi sjávar á norðlægum slóðum.

Gagnasöfnun og aðferðir

Gögnum var safnað í 10 rannsóknaleiðöngurum árin 2006 til 2008, sbr. töflu 1 og 1.-10. mynd. Gagnasöfnun fór fram á þrenns konar stöðvum: 1) Á umhverfisstöðvum var gögnum safnað um helstu þætti vistkerfisins, ólífræna og lífræna, þ.e. hafaðlisfræði (hitastig, selta o.fl. þættir), hafefnafræði (næringarefni, kolefni), svífpörunga, og dýrasvíf. 2) Á "Tuckerstöðvum" var safnað loðnulirfum og tekin sýni til að mæla helstu umhverfispætti. 3) Á togstöðvum var flotvarpa notuð til að safna loðnu og öðrum uppsjávarfiskum, þar með talið fiskseiðum.

Hafeðlisfræði

Mælingar á hita, seltu, súrefni og ljómun (mælikvarði á gróðurmagn, e. “in vivo fluorescence”) voru gerðar á hverri umhverfisstöð með siritandi nemum á „sondu” sem slakað var frá skipinu frá yfirborði til botns. Sondan mælir þessa þætti 24 sinnum á sekúndu og tekur síðan meðaltal af hverjum fjórum mælingum og gefur því 6 gildi á sekúndu. Sondunni var slakað með u.þ.b. eins meters hraða á sekúndu og gefur því u.þ.b. 6 gildi á hverjum dýpismetra og samfelldan dýptarferil af þessum þáttum. Sjósýni voru tekin á hverri stöð til að kvarða seltu- og súrefnisnema sondunnar. Sjósýni, til seltugreininga eða greiningar á öðrum þáttum, voru tekin með allt að tólf 5 lítra sjótökum sem festir voru á sama ramma og sondan. Sjótökunum var lokað á tilteknum dýpum með fjarstýringu og þannig tekið sjósýni á þeim dýpum.

Hafefnafræði

Á öllum umhverfisstöðvum var safnað allt að 12 sýnum, á mismunandi dýpi, til mælinga á næringarefnum, þ.e. nítrati (NO₃), fosfati (PO₄) og kísli (Si). Magn næringarefna var mælt jafnóðum um borð með hefðbundnum aðferðum. Á hverri stöð var hægt að taka að hámarki 12 sýni í einu kasti. Með hliðsjón af þörungarannsóknum þarf að mæla næringarefni þétt í efstu 50 metrunum (5-6 sjótakar) og voru

þá 6-7 sjótakar eftir fyrir allan neðri hluta vatnssúlunnar, þ.e. frá 100 m dýpi til botns. Sýnatakan var því gisin þar sem botndýpi var meira en ca. 1200 metrar

Samfelldar mælingar voru gerðar í yfirborði sjávar með siritandi tækjum um borð í rs. Bjarna Sæmundssýni. Tækin mældu hlutþrýsting koltvísýrings (pCO₂) og súrefni (O₂) á siglingaleið skipsins. Sýni til kvörðunar á siritandi pCO₂ og O₂ nemum voru tekin reglulega.

Á tveimur stöðvum á sniði á 69°N voru ennfremur teknir dýptarferlar af hlutþrýstingi koltvísýrings, ólífrænu kolefni (TIC), súrefni og sporefnum frá yfirborði til botns.

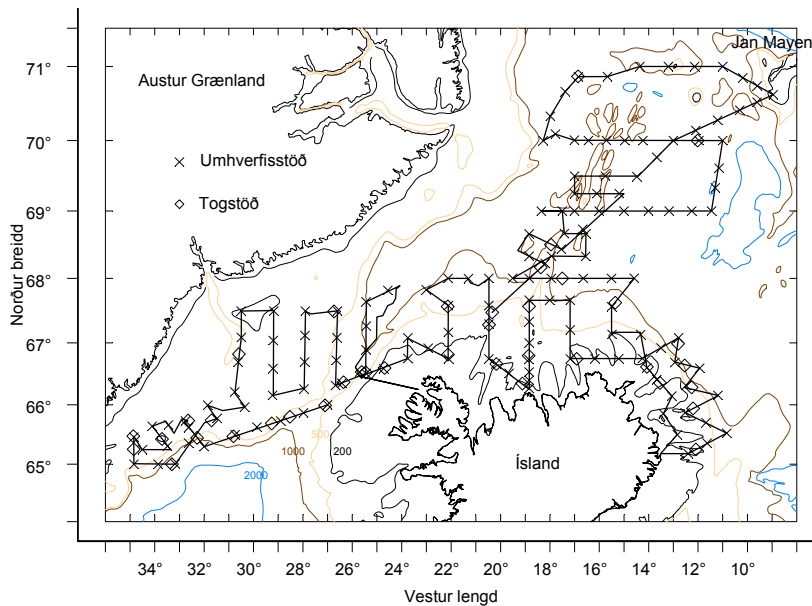
Svifþörungar

Blaðgræusýni voru tekin með sjótökum á öllum umhverfisstöðvum á fjórum til fimm dýpum (0, 10, 20, 30, 50 m). Ákveðið rúmmál (0,5-2 l) af sjó var síað gegnum GF/F Millipore síur sem síðan voru lagðar í 90% acetón og frystar. Sýnin voru ýmist mæld um borð eða í landi að leiðangri loknum. Á hverri umhverfisstöð var ljómun svifþörungum mæld (in vivo fluorescence) með sérstökum ljómunarmæli á sondunni (SeaPoint) til að meta breytingar á magni svifþörungum með dýpi. Úrvinnsla blaðgræusýna fór þannig fram að blaðgrænan var leyst upp í 90% acetóni og lausnin mæld í litrófsmæli (spectrophotometer) eftir aðferð Strickland og Parsons (1972). Niðurstöður voru

Tafla 1. Leiðangrar, fjöldi stöðva og verkefni 2006 til 2008. Sjá 1.- 10. mynd.

Table 1. Surveys, number of stations worked and tasks 2006 through 2008. Figures 1-10.

Leiðangur Survey	Mynd Fig.	Tími Date	Stöðvar Stations	Verkefni Tasks
B2-2006	1	7.-10.2. 2006	15	Ástand sjávar, þörungasvif og djúpdýrasvif á 68-69°N í Íslandshafi.
B4-2006	2	18.-26.5. 2006	34	Ástand sjávar, þörungasvif og dýrasvif á fjórum sniðum í Íslandshafi.
B6-2006	3	10.7.-3.8. 2006	191	Vistkerfi Íslandshafs og landgrunns Íslands: Umhverfisstöðvar 152, togstöðvar 39.
A11-2006	4	21.-26.11. 2006	2	Djúpdýrasvif á 68°N í Íslandshafi.
B3-2007	5	12.-14.2. 2007	11	Ástand sjávar, þörungasvif og djúpdýrasvif á 68-69°N í Íslandshafi
B6-2007 (fyrrri hluti)	6	12.-18.4. 2007	41	Loðnulirfur sunnan lands og vestan.
B6-2007 (seinni hluti)	6	19.-24.4. 2007	30	Ástand sjávar, þörungasvif og djúpdýrasvif á þremur sniðum í Íslandshafi.
B8-2007	7	14.-27.5. 2007	86	Loðnulirfur umhverfis land í vorleiðangri.
B11-2007	8	8.-28.8. 2007	216	Vistkerfi Íslandshafs og landgrunns Íslands: Umhverfisstöðvar 132, loðnulirfur 44 stöðvar, togstöðvar 44.
B6-2008	9	1.-5.5. 2008	22	Ástand sjávar, þörungasvif og djúpdýrasvif á 68-69°N í Íslandshafi.
A11-2008	10	6.8.-3.9. 2008	205	Vistkerfi Íslandshafs og landgrunns Íslands: Umhverfisstöðvar 160, togstöðvar 55.



3. mynd. B6-2006. Umhverfis- og togstöðvar í Íslandshafi og nálægum hafsvæðum 10.7.-3.8. 2006

Figure 3. Environmental and trawl stations in the Iceland Sea 10.7.-3.8. 2006.

notaðar til að kanna dreifingu blaðgrænu lárétt og lóðrétt en einnig til að kvarða lóðréttar ljóm-unarmælingar á hverri stöð og láréttar ljóm-unarmælingar í yfirborði milli stöðva.

Um borð í rannsóknaskipinu var sérstakur ræktunarskápur til frumframleiðnimælinga á svifþörungum. Afkastamark svifþörungum var mælt á 10 m dýpi á völdum stöðvum. Í sjósýni var bætt geislavirku kolefni (^{14}C) og sýnin ræktuð við mismunandi ljósstyrk í ræktunarskápnnum við það hitastig sem mældist í sjónum þar sem sýnin voru tekin. Sýnin voru síuð gegnum Membrane síur ($0,2\ \mu\text{m}$) að lokinni ræktun og geislavirkni þeirra mæld í geigerteljara í landi. Frumframleiðni ($\text{mgC}/\text{m}^3/\text{klst}$) svifþörungum var reiknuð út við tiltekið ljósmagn og í framhaldi af því reiknað afkastamark svifþörungum (Kristinn Guðmundsson o.fl. 2004).

Sýnum til talninga og greininga á svifþörungum var safnað á flestum umhverfisstöðvum. Annars vegar var safnað í yfirborði með finriðnum háf ($20\ \mu\text{m}$ möskvi) og hins vegar voru tekin 2-5 sjótakasýni á staðaldýpum frá yfirborði niður á 50 m dýpi. Greining svifþörungum fór fram í landi. Uppblönduðum sýnum var hellt í 50 ml sethólk. Þegar svifþörungarnir höfðu sest til voru þeir taldir og greindir í öfugri smásjá (Utermöhl 1931). Niðurstöður eru gefnar sem frumfjöldi í lítra fyrir hverja tegund eða hóp svifþörungum.

Sjónkýpi var mælt með Secchi disk (sjónskifu) á hverri stöð meðan dagsbirtu naut og sjólag leyfði. Niðurstöður voru notaðar til að meta dýpt ljóstillifunarlagsins.

Á siglingu skipsins voru gerðar samfelldar

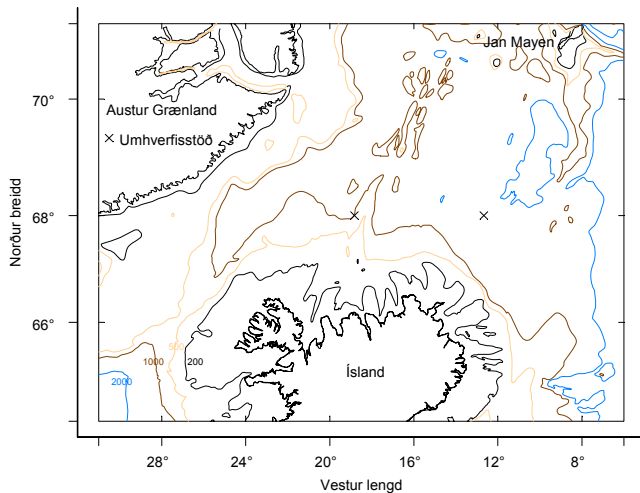
mælingar á hita, seltu og ljómun svifþörungum í sjó, sem tekinn var inn um sjóinntak í skipinu (á 4–5 m dýpi) og leiddur inn á sírennsliskerfi með tilheyrandi nemum. Þessum mælingum var safnað jafnóðum í tölvuskrá. Sömu leiðis var safnað upplýsingum um ljósmagn frá ljósnema á gálga skipsins og þær skráðar inn á sömu tölvuskrá. Þessar mælingar voru tengdar GPS staðsetningakerfi. Þannig fengust gögn um breytingar á magni blaðgrænu á siglingaleið skipsins. Þessar mælingar voru kvarðaðar á móti mældri blaðgrænu. Slík kvörðunarsýni voru tekin reglulega úr þessu mælikerfi, eða eitt sýni á hverri stöð.

Dýrasvif

Á hverri umhverfisstöð voru tekin sýni á tveimur dýptarbilum með WP2-átuháfi, þ.e. á 0–50 m dýpi og 0–200 m dýpi. Hverju sýni var skipt í tvo hluta, og var annar hlutinn varðveittur í formalíni til tegundagreiningar, en hinn frystur til mælingar á lífmassa. Sýnin voru vegin á sjóvog með $0,1\ \text{g}$ nákvæmni (votvigt).

Á tilteknum umhverfisstöðvum var dýrasvifi safnað með “multinet” dýrasvifsháfi á eftirfarandi dýptarbilum: 0-50-100-200-300-400 m. Votvigt sýnanna var mæld um borð og þau síðan sett í formalín eða fryst. Á allt að 10 umhverfisstöðvum í leiðangri var dýrasvifi safnað í allri vatnssúlunni á eftirfarandi dýptarbilum: 0-50-100-200-400-600-800-1000-1200-1800 m. Sýnin voru varðveitt í formalíni.

Í ágúst árin 2007 og 2008 var að auki sonefndur Tucker-háfur nýttur á völdum stöðvum til að safna stærri svifdýrum (einkum ljósátu og marflóm). Háfnun var slakað niður á 100 m



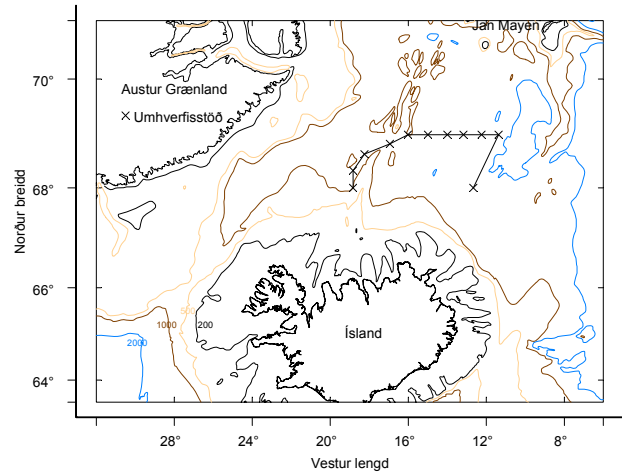
4. mynd. A11-2006. Umhverfisstöðvar í Íslandshafi 21.-26. nóvember 2006.

Figure 4. Environmental stations in the Iceland Sea 21-26 November 2006.

dýpi (einu sinni niður á 200 m) og hann síðan hífður aftur upp að yfirborði á meðan skipið sigldi á 1–2 hnúta ferð.

Í ágúst 2008 (leiðangur A11-2008) var svonefnd svifsjá (Video Plankton Recorder) notuð til rannsókna á dýrasvifi á 15 stöðvum. Svifsjain er í raun neðansjársmásjá sem tekur í sífellu hágæða stafrænar litmyndir (u.þ.b. 15 myndir á sekúndu) af svifi og lífrænu reki sem er frá 50 μm til nokkurra sentímetra að stærð. Jafnframt eru hiti, selta og dýpi mæld. Svifsjain tekur myndirnar í þekktu rúmmáli sjávar þannig að úrvinnsla myndefnisins gefur kost á að fá magnbundnar upplýsingar um mergð svifdýranna, þ.e. fjölda á rúmmálseiningu. Tækið nýtist því til að kortleggja svifið með mikilli upplausn í tengslum við umhverfisþætti í sjónum. Í leiðangrinum var svifsjaini yfirleitt slakað lóðrétt frá skipshlið niður á 200 m dýpi og upp aftur á meðan skipið var kyrrt.

Á um 20 völdum stöðvum í sumarleiðangri var hrygning algengustu krabbaflóa (*Calanus* spp, *Metridia longa*) mæld. Á þessum stöðvum voru teknir tveir WP2 háfar (0–100 m). Annar var notaður til að safna lifandi dýrum, en hinn til að fá magnbundið sýni (varðveitt í formalíni). Mæling á hrygningu (eggjaframleiðslu) fólst í því að kvendýr voru tínd úr sýnunum, þeim haldið lif-andi um borð í þar til gerðum ílátum í einn sólarhring, og fylgst með hrygningu dýranna. Eggj sem þau framleiddu voru talin. Þessi gögn voru notuð til að athuga umfang og breytileika hrygningar í tengslum við umhverfisþætti.



5. mynd. B3-2007. Umhverfisstöðvar í Íslandshafi 12.-14. febrúar 2007.

Figure 5. Environmental stations in the Iceland Sea 12-14 February 2007.

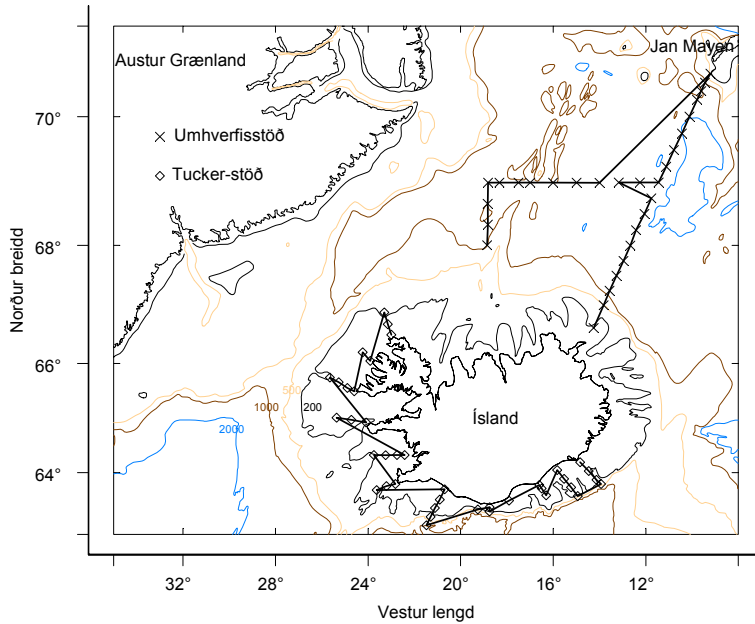
Fæðukeðjur

Fæðuvistfræðileg tengsl plöntu- og dýrahópa voru metin með því að mæla hlutfall stöðugra samsæta og greina fitusýrur í þessum hópum. Sýnum var safnað á þremur til fjórum svæðum í Íslandshafi. Þörungum var safnað með þörunga-háfi, krabbaflóm með WP2 háfi eða “multinet” dýrasvifsháfi og stærri tegundum með ljósátuvörpu eða flotvörpu. Eftirfarandi tegundum/hópum var safnað á hverju svæði: Svifþörungum, dýrasvifstegundunum *C. finmarchicus*, *C. glacialis*, *C. hyperboreus*, *M. Longa* og *Pseudocalanus* spp., algengri ljósátu, algengri marfló og loðnu. Úrvinnsla hvers sýnis var endurtekin þrisvar sinnum.

Til fitusýrumælinga voru svifþörungar síaðir úr sjó og sían sett í glas með C:M lausn og fryst. Aðrar tegundir voru flokkaðar til tegunda og þroskastiga og settar í glas með C:M lausn og frystar. Fyrir samsætumælingar voru þörungar síaðir úr sjó og sían fryst. Aðrar tegundir voru frystar (flokkaðar fyrst ef tíminn leyfði). Öll sýnin voru send til Tromsø, Noregi, til greininga.

Loðnulirfur

Loðnulirfum var safnað með Tucker háfi með 1 m² opnun og 330 μm möskva að vor- og sumarlagi, en í ágúst var notaður Tucker háfur með 4 m² opnun og 1 mm möskva. Háfarnir voru dregnir á eftir skipinu og jafnframt slakað rólega frá yfirborði niður á 50 m dýpi og síðan hífðir aftur upp. Þá var loðnulirfum einnig safnað með seiddavörpu í ágúst. Opnun seiddavörpunnar er um 18 x 18 m og möskvastærð í poka 5



6. mynd. B6-2007. Umhverfisstöðvar í Íslandshafi og Tucker-stöðvar (loðnulirfur) við Ísland 12.-24. apríl 2007.

Figure 6. Environmental stations in the Iceland Sea and Tucker stations (capelin larvae) in Iceland waters 12-24 April 2007.

x 5 mm. Varpan var dregin á því dýpi, sem lóðningar komu fram á (20–50 m).

Frumúrvinnsla fólst í tegundagreiningu og talningu eggja og lirfa af öllum tegundum og lengdarmælingu á loðnulirfum. Frekari úrvinnsla fólst í kvörnun, slípun og aldursgreiningu kvarna, þurrkun og vigtun á loðnulirfum.

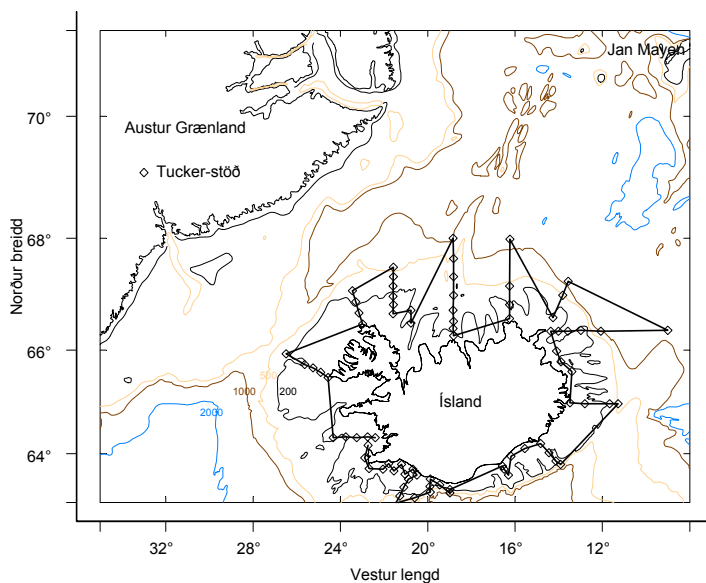
Loðna

Samfelldar mælingar voru gerðar á fjölda fiska á siglingarleið skipsins með bergmáls- og tegurmælum og tekin sýni með flotvörpu til að sannreyna á hverju lóðaði. Að jafnaði var togað á ca. 50 sjm. fresti, en oftast þegar bergmálsstæki sýndu breytt útlit og/eða styrk lóðninga. Lóðningar voru skráðar sjálfvirkir í gagnagrunn og þær má því skoða og túlka á

tölvuskjá hvenær sem þörf er á, m.a. með hliðsjón af tilheyrandi flotvörpusýnum.

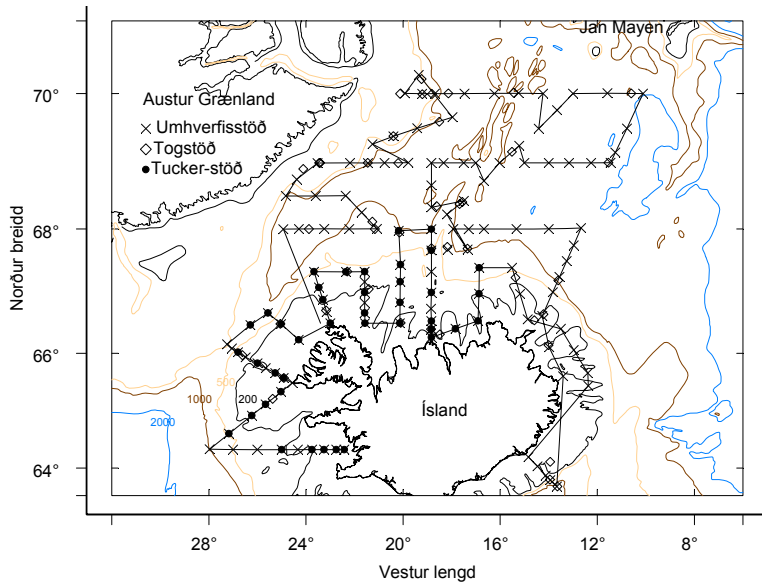
Fengist loðna í togi var tiltekinn fjöldi fiska tekinn af handahófi til líffræðilegra mælinga. Fjöldi fiska í sýni ræðst af lengdardreifingu loðnu í viðkomandi togi en yfirleitt voru teknar 100 loðnur til rannsóknar í hvert skipti og hlutsýni til rannsóknar á fæðu og fitumælinga. Teknir voru 20 margar á stöð til fæðugreiningar. Um 50 fiskar voru frystir á nokkrum stöðvum til fitumælinga í samvinnu við Matis.

Allir fiskar í sýni (allt að 100) voru kvarnaðir, lengdarmældir og vigtaðir, kyn- og kynþroskagreindir og aldursgreindir. Fæðumagn í maga var greint til tegunda eða hópa eftir ástandi fæðu. Heildarmagn í maga var



7. mynd. B8-2007. Tucker-stöðvar (loðnulirfur) umhverfis Ísland 14.-27. maí 2007.

Figure 7. Tucker stations (capelin larvae) in Iceland waters 14-27 May 2007.



8. mynd. B11-2007. Umhverfisstöðvar, Tucker-stöðvar (loðnulirfur) og togstöðvar í Íslandshafi og við Ísland 8.-28. ágúst 2007.

Figure 8. Environmental stations, Tucker (capelin larvae) and trawl stations in the Iceland Sea and in Iceland waters 8-28 August 2007.

vigtað og hlutdeild tegunda/hópa áætluð með hliðsjón af rúmtaki.

Á meðan á leiðangri stóð var daglega farið yfir bergmálmælingar síðasta sólarhrings og lóðningar bornar saman við skráð meðaltöl bergmálgilda (S_A , $m^2/n.m^2$). Voru þá vinsuð úr öll afbrigðileg gildi svo sem truflanir frá botni og endurvarp frá öðrum lífverum en þeim sem verið var að rannsaka. Meðalgildi bergmáls á flatarmálseiningu var reiknað og síðan notuð hin hefðbundna jafna fyrir endurvarpsstuðul (TS) loðnu ($TS=19.1 \log L-$

74.5dB) til að reikna fjölda fiska á flatarmálseiningu. Þetta var gert fyrir eins margar flatarmálseiningar og þurfa þótti en einföld samlagning gefur síðan heildarfjölda fiska. Niðurstöður úr togsýnum voru notaðar til að breyta þessum fjölda fiska í lífþunga eftir aldri og lengd.

Umfang gagna

Umfang gagna 2006 til 2008 er sýnt í töflu 2. Gögnum var safnað á 203 umhverfisstöðvum 2006, 173 stöðvum 2007 og 182 stöðvum 2008.

Tafla 2. Fjöldi stöðva og fjöldi sýna að baki gagnasöfnun eftir leiðongrum og fagsviðum 2006 til 2008.

Table 2. Number of stations worked and samples collected by surveys and disciplines 2006 through 2008.

Fjöldi stöðva		Haffræði			Svifþörungur			Dýrasvíf				Fiskar		Fæðukeður
Leiðangur	Árstími	CTD*	Nær.efni	Kolefni	Blaðgræna	Framl.	Taln.+háfs.	WP2	Multinet	Tucker	Svifsjá	Loðnulirf.	Flotvarpa	Háfar/troll
B2-2006	Febr.	15	15	3	6		6		5					
B4-2006	Maí	34	33	15	34	10	34	34	6					
B6-2006	Júlí	152	151	6	152	26	131	148	55				39	
A11-2006	Nóv.	2	1		2		1		2					
2006	Alls	203	200	24	194	36	172	182	68			0	39	0
B3-2007	Febr.	11	10	2	7		6		6					
B6-2007	Apríl	30	30	23	30	8	30	33	11*			39		14
B8-2007	Maí								2			80		6
B11-2007	Agúst	132	106	2	120	15	89	92	7	12		40	44	46
2007	Alls	173	146	27	157	23	125	125	24			159	44	66
B6-2008	Maí	22	22	3	22	7	22	15	6					
A11-2008	Agúst	160	141	11	156	32	131	131		15	13		55	38
2008	Alls	182	163	14	178	39	153	146	6	15	13		55	38

*Sonda

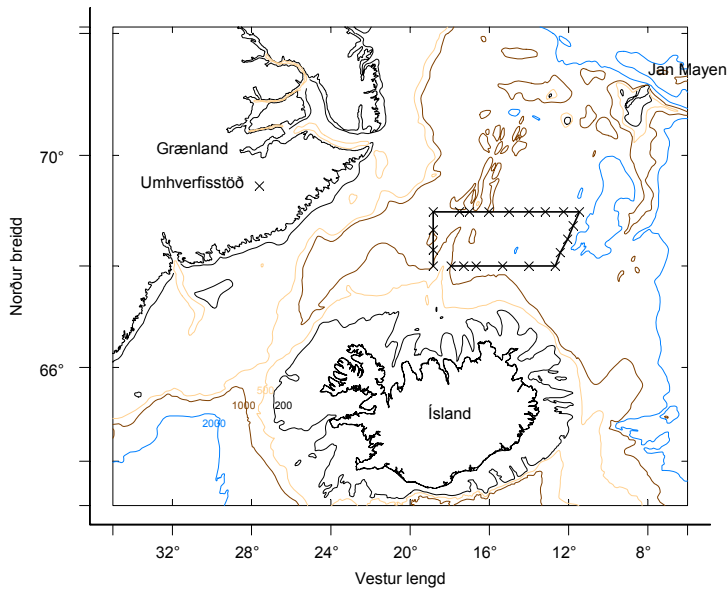
* Par af Bongo 8

Fjöldi sýna		Haffræði			Svifþörungur			Dýrasvíf				Fiskar				Fæðukeður
Leiðangur	Árstími	CTD	Nær.efni	Kolefni	Blaðgræna	Framl.	Taln.+háfs.	WP2	Multinet	Tucker	Svifsjá	Loðnulirf.*	Lífmael.	Fæða	Fitusýni	Háfar/troll
B2-2006	Febr.	15	239	36	12	0	6		39							
B4-2006	Maí	34	368	180	180	143	135	25	54							
B6-2006	Júlí	152	1440	80	566	351	299	219	304				23	12	4	
A11-2006	Nóv.	2	12		2		1		21							
2006	Alls	203	2059	296	760	494	441	330	422				23	12	4	
B3-2007	Febr.	11	120	24	14		6		62							84
B6-2007	Apríl	30	360	276	167	117	97	23	50*			78				36
B8-2007	Maí								21			160				
B11-2007	Agúst	132	1270	24	557	182	186	181	74	12		80	32	13	3	276
2007	Alls	173	1750	324	738	299	289	204	227	12		318	32	13	3	396
B6-2008	Maí	22	280	45	132	91	83	15	67							
A11-2008	Agúst	160	1400	80	636	428	314	275		15	13		41	13	1	459
2008	Alls	182	1680	125	768	519	397	290	67	15	13		41	13	1	459

* Par af Bongo 16

*Loðnulirfur í Tucker og dýrasvíf í háf

** Par af Tucker 12



9. mynd. B6-2008. Umhverfisstöðvar í Íslandshafi 1.-5. maí 2008.

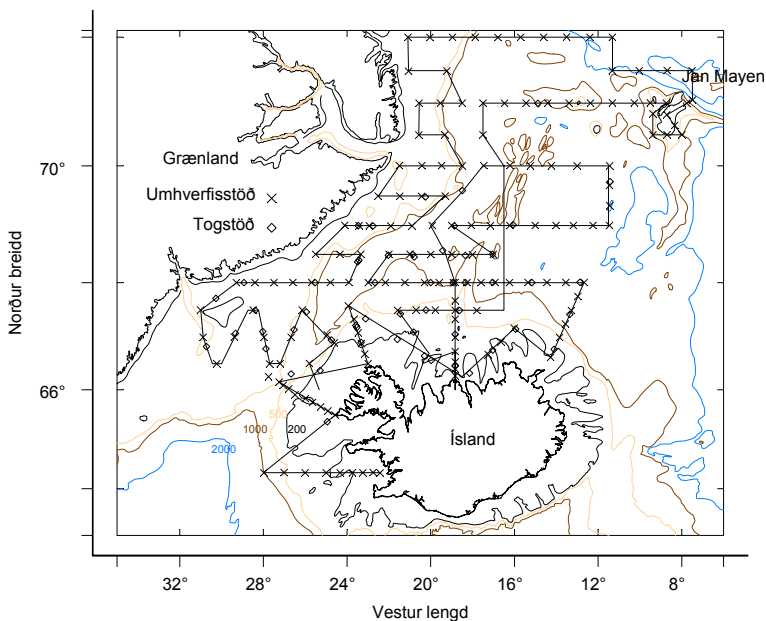
Figure 9. Environmental stations in the Iceland Sea 1-5 May 2008.

Sýnataka var misjöfn eftir fagsviðum. Sondusýni (CTD) eru sýnd jafnmörg og sondustöðvar, enda þótt CTD-mælingar á hverri stöð séu í raun margfalt fleiri, sbr. það sem áður var sagt um þetta atriði. Flest sýni voru tekin til mælinga á næringarefnum árið 2006 eða 2059 og heldur færri hin árin eða 1750 og 1680. Bláðgræna var mæld í um 750 sýnum hvert ár, en frumframleiðnisýni og talningarsýni voru talsvert færri. Söfnun á dýrasvífssýnum var mjög umfangsmikil árið 2006 (752 sýni), en talsvert minni árið 2007 (443) og minnst árið 2008 (385). Tæplega 400 sýni voru tekin til rannsókna á fæðukeðjum 2007 og 459 sýni árið 2008. Öll árin var samfelld gagnasöfnun á siglingaleið rannsóknaskipsins á ýmsum umhverfisþáttum, sbr. fyrri lýsingu.

Rúmlega 300 sýnum var safnað vegna rannsókna á loðnulirfum 2007. Sýnataka vegna rannsókna á loðnu og fleiri fisktegundum fór fram á 39 til 55 stöðvum að sumarlagi hvert ár. Samfelld bergmálmæling var auk þess gerð á siglingaleið skipsins, sem nam um 3500 sjm. árið 2006, 3300 sjm. 2007 og 4500 sjm. 2008.

Þakkir

Gagnasöfnun í þessu verkefni fór fram í rannsóknaleiðöngrum á skipum Hafrannsóknastofnunarinnar rs. Bjarna Sæmundssyni og rs. Árna Friðrikssyni. Áhafnarmedlimir rannsóknaskipanna tóku virkan þátt í þessari vinnu og er þeim þakkað fyrir vel unnin störf.



10. mynd. A11-2008. Umhverfisstöðvar og togstöðvar í Íslandshafi og á landgrunni Íslands 6. ágúst - 3. september 2008.

Figure 10. Environmental and trawl stations in the Iceland Sea and in Iceland waters 6 August through 3 September 2008.

Heimildir

- Hjálmar Vilhjálmsson 2002. Capelin (*Mallotus villosus*) in the Iceland-East Greenland-Jan Mayen ecosystem. *ICES Journal of Marine Science* 59: 870-883.
- Kristinn Guðmundsson & Kristín Valsdóttir 2004. Frumframleiðnimælingar á Hafrannsóknastofnuninni árin 1958-1999. Umfang, aðferðir og úrvinnsla. *Hafrannsóknastofnunin Fjölrit nr. 107*, 56 bls.
- Strickland, J. D. H. & Parsons, T. R. 1972. A practical handbook of seawater analysis. *Fisheries Research Board of Canada* 167 (1): 310 bls.
- Utermöhl, H. 1931. Neue Wege in der quantitativen Erfassung des Planktons *Verhandlungen des Internationalen Vereins für theoretische und angewandte Limnologie*. 5: 567-596.
-

Ástand sjávar og straumar í Íslandshafi

Héðinn Valdimarsson og Steingrímur Jónsson

Hafrannsóknastofnunin

Ágrip

Héðinn Valdimarsson og Steingrímur Jónsson 2012. *Ástand sjávar og straumar í Íslandshafi. Hafrannsóknir nr. 164.* Athuganir á hita og seltu sjávar ásamt straumum voru hluti af rannsóknum á vistkerfi Íslandshafs á árunum 2006–2008. Hér er lýst niðurstöðum endurtekinna athugana á sniði eftir 69°N en þær athuganir voru ákveðinn kjarni verkefnisins. Á árunum um og eftir 2000 jukust áhrif hlýsjávar í sunnanverðu Íslandshafi líkt og á öllu landgrunninu við Ísland. Tiltölulega hlýr og saltur sjór barst einnig úr norðri og austri inn í Íslandshaf. Eftir að endurteknar mælingar sýndu ákveðið munstur í ástandi sjávar við Kolbeinseyjarhrygg voru gerðar athuganir á straumum, bæði með straummælingum frá skipi og klifursondu, sem komið var fyrir á lögn við hrygginn. Niðurstöður benda til þess að hringstraumur sé viðvarandi austanvert á og við hrygginn en það getur haft áhrif á lífríkið á svæðinu. Mælingar þessar skiluðu jafnframt aukinni þekkingu á árstíðabreytingum sjávar norður af Íslandi.

Abstract

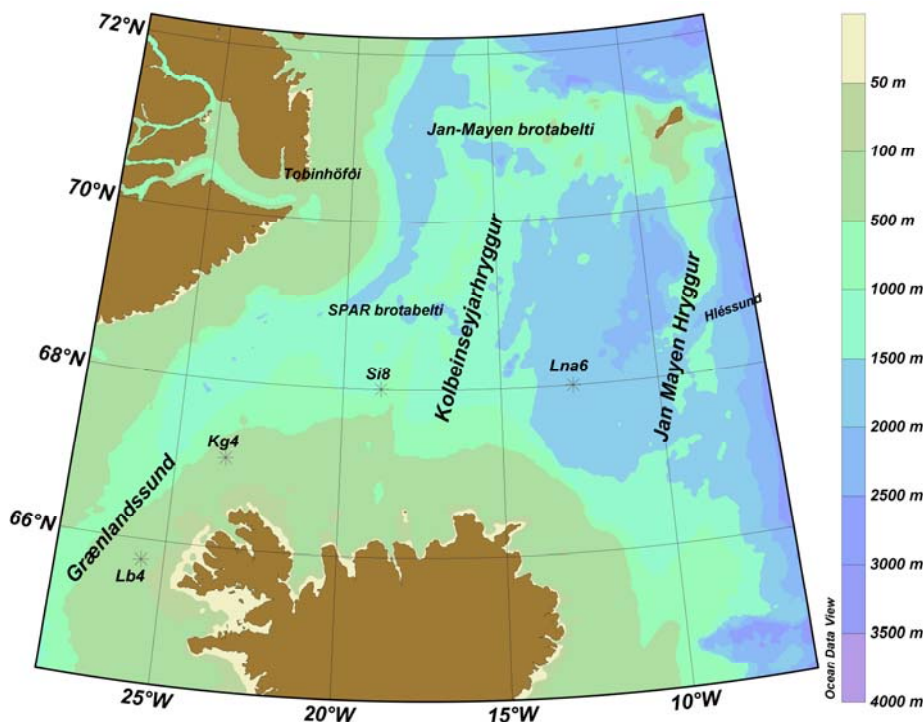
Héðinn Valdimarsson and Steingrímur Jónsson 2012. *Hydrographic conditions and currents in the Iceland Sea. Marine Research in Iceland no. 164.* Hydrographic observations were an integral part of the Iceland Sea Ecosystem Project in the years 2006–

2008. A description is given of the repeated hydrography on a section along 69°N but various observations on that section were a certain backbone of the project. Around and after the turn of the last century increased influence of Atlantic water was observed in the southern part of the Iceland sea as well as on the shelf around Iceland. Relatively warm and saline water was also carried into the Iceland Sea from the north and east. Repeated observations of a certain hydrographic pattern on the Kolbeinsey Ridge lead to measurements of currents by ship-borne ADCP and with a moored profiler deployed at the ridge. Results of these observations confirm the existence of a permanent eddy, at the eastern flank of the ridge, which may act as a retention area. Observation also resulted in increased knowledge of the seasonality in the waters north of Iceland.

Inngangur

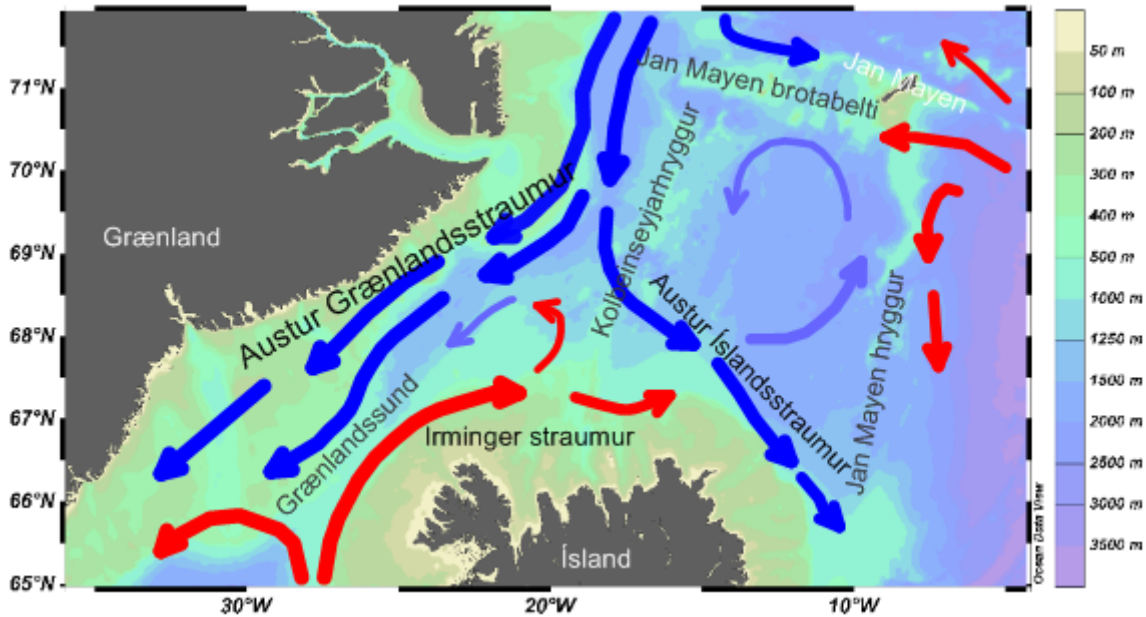
Íslandshaf nefnist hafsvæðið sem afmarkast af Grænlandssundi, og línu dreginni norðan Tobinhöfða á Grænlandi yfir að Jan Mayen og síðan með Jan Mayen hryggnum suður á Íslands-Færeyjahrygg.

Botnlögun Íslandshafs er sýnd á 1. mynd. Mesta dýpi í Íslandshafi er í hafinu austanverðu nærri Jan Mayen hryggnum. Íslandshaf er grynnt Norðurhafa og hefur verið kallað



1. mynd. Botnlögun Íslandshafs. Sýndar eru fjórar fastastöðvar sem vísað er til í texta (Lb4, Kg4, Si8 og Lna6).

Figure 1. Topography of the Iceland Sea. Shown are repeated hydrography stations referred to in the text (Lb4, Kg4, Si8 and Lna6).



2. mynd. Straumar í Íslandshafi (eftir Ólafi K. Pálssyni o.fl. 2012).

Figure 2. Circulation in the Iceland Sea (after Ólafur K. Pálsson et al., 2012).

Íslandssléttan eða “Iceland Plateau” af þeim sökum. Kolbeinseyjarhryggur deilir Íslandshafi í tvö dýpi. Það vestara, sem oft gengur undir nafninu Blossville dýpið eða “Blosseville Basin”, er á milli Grænlands og hryggjarins, en það austara, sem er víðfeðmara, er á milli Kolbeinseyjarhryggjar og Jan Mayen hryggjar. Kolbeinseyjarhryggurinn gengur norður á svonefnt Jan Mayen brotabelti milli Jan Mayen og Grænlands en um og sunnan við 69°N er skarð í honum á svonefndu SPAR brotabelti. Norðan við Jan Mayen heldur svo Mohns hryggur áfram norður í Norður-Grænlandshaf (Greenland Sea) (Karl Gunnarsson 1980). Mesta dýpi á Jan Mayen brotabeltinu er um 1600-1700 m. Á hryggnum milli Íslands og Grænlands, þ.e. í Grænlandssundi, er mesta dýpi um 650 m. Austur á Jan Mayen hryggnum, í svonefndu Hléssundi, er mesta dýpi um 1900-2000 m eða svipað og dýpi er mest í Íslandshafi.

Yfirborðsstraumar í Íslandshafi einkennast annars vegar af pólsjó sem streymir norðan úr Íshafi til suðurs með Austur-Grænlandsstraumi og hins vegar af Atlantssjó sem streymir úr suðri (2. mynd). Grein úr Irmingerstraumi flæðir í gegnum Grænlandssund og þaðan til austurs inn í Íslandshafið, með íslenska landgrunninu, og að hluta til norðurs með Kolbeinseyjarhrygg. Önnur grein Atlantssjávar streymir austan úr Noregshafi, sunnan við Jan Mayen, inn í Íslandshaf. Grein úr Austur-Grænlandsstraumi, svonefndur Austur-Íslandsstraumur, berst svo

suðaustur yfir Íslandshaf og yfir í Noregshaf. Í Íslandshafi eru síðan blöndunarsvæði þessara straumkjarna bæði lárétt og lóðrétt (Unnsteinn Stefánsson 1962, 1999; Blindheim & Østerhus 2005). Djúpsjór streymir í átt að Grænlandssundi ýmist norðan úr Norður Grænlandshafi eða austanvert úr Íslandshafi, en nýlegar rannsóknir hafa sýnt að mikið djúpvatn er komið af þessum slóðum. Á síðustu árum hefur verið sýnt fram á að streymi djúpsjávar er til vesturs með landgrunnskanti Íslands, nánast frá Jan Mayen hrygg, og að sjór sem þar flæðir getur tengst blöndun í Íslandshafi (Våge o.fl. 2011).

Mikilvægur viðbótarþáttur fyrir hita-seltubúskap Íslandshafs er síðan streymi hlý-sjávar sem hefur kólnað og sokkið vestan við Svalbarða og liggur utanvert og neðan við Austur-Grænlandsstrauminn alla leið suður í Íslandshaf. Þessi sjór er nefndur millisjór (Return Atlantic Water, Intermediate Water eða Iceland Sea Intermediate Water). Hluti þessa sjávar blandast inn í Íslandshafið og sogast að hluta inn í yfirfallsjó er rennur suður um Grænlandssund.

Sjögerðir í Íslandshafi eru því í megin-dráttum þrjár: 1) Atlantssjór (Atlantic Water) úr suðri og austri í sunnan- og austanverðu hafinu, 2) pólsjór (Polar Water) úr norðri í hafinu vestanverðu og 3) svonefndur svalsjór (Arctic Water), sem er blanda þessara tveggja sjögerða, miðsvæðis í Íslandshafi.

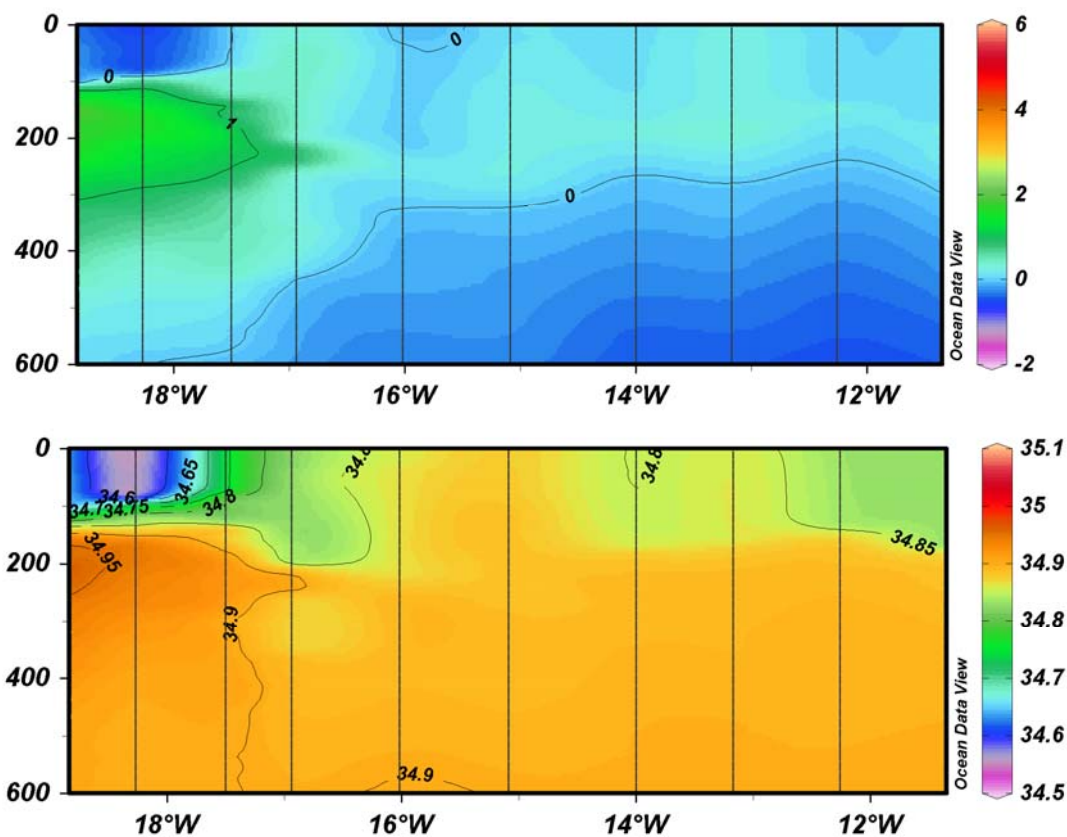
Efniviður og aðferðir

Leiðöngurum sem farnir voru í Íslandshaf, og gagnasöfnun í þeim, er lýst ýtarlega í fyrstu grein þessa rits. Í öllum þessum leiðöngurum voru gerðar sjófræðilegar athuganir á sniði eftir 69°N, eða sem næst því. Í stöku leiðangri voru gerðar athuganir á öðrum sniðum, en umfangsmiklir leiðangrar að sumarlagi gefa tilefni til láréttra dreifingarmynda í viðbót við snið.

Í september 2007 var sjórannsóknalögn komið fyrir vestan megin á Kolbeinseyjarhrygg (staðsetning: 68°02.833'N - 18°47.890'V) þar sem botndýpi var 1026 m (21. mynd). Þessi staður er mjög nærri stöð Si8 (á stað 68°N og 18°50'V, 1. mynd), sem er ein af föstum mælistöðvum Hafrannsóknastofnunarinnar, þar sem hiti og selta hafa verið mæld ársfjórðungslega frá 1970. Reynt var að ná lögninni upp í október 2008 en það tókst ekki þar sem sleppi-búnaður virkaði ekki, en í ágúst 2009 var hún slædd upp. Á lögninni var mælitæki (McLane moored profiler eða klifursonda) sem getur skriðið eftir lögninni frá rúmlega 1000 m dýpi og upp undir 100 m og mælt á leiðinni hita,

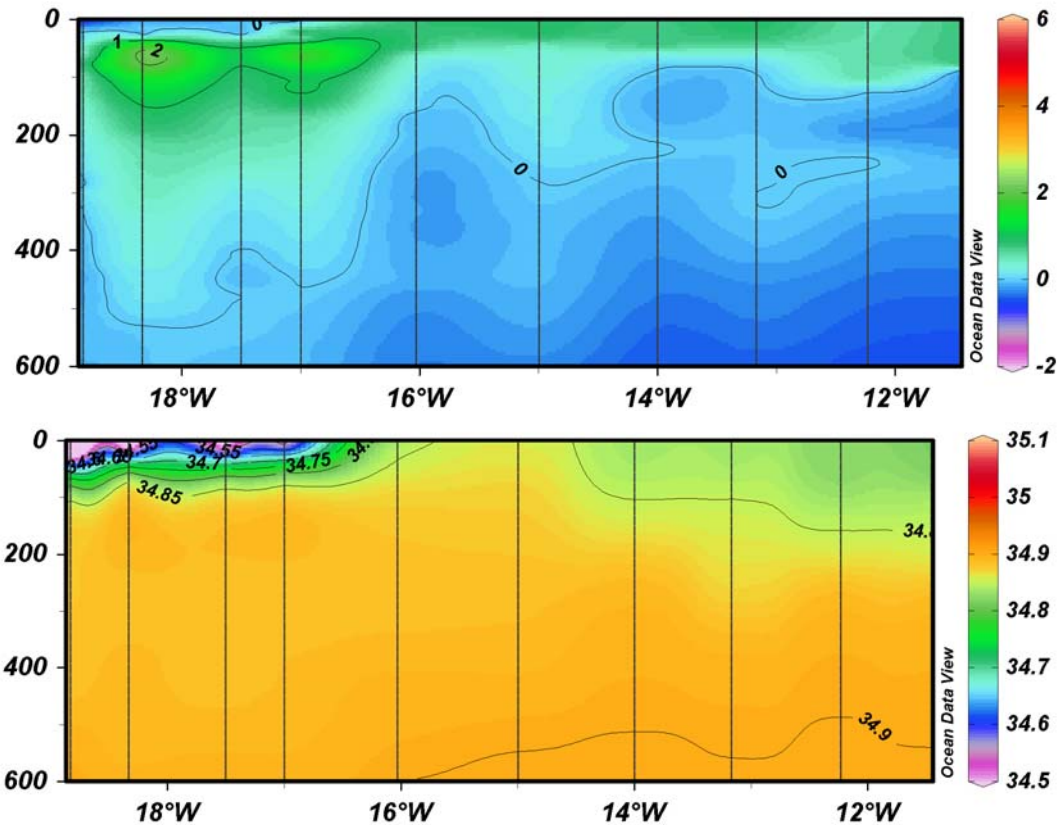
leiðni (seltu), þrýsting (dýpi) og straum. Tækið var stillt þannig að á miðnætti, dag hvern, skreið það frá neðstu stöðu upp að 106 m dýpi og stöðvaðist þar, en fór síðan aftur niður eftir lögninni klukkan 6 að morgni og mældi því vatnssúluna tvisvar á sólarhring. Hraði klifursondunnar er um 0,25 m/s og tekur því eina klst. að mæla vatnssúluna. Klifursondan mælir tvisvar á sekúndu en í úrvinnslu gagna eru tekin meðaltöl yfir um 2 m dýpisbil. Klifursondan mældi í 423 daga, eða 846 dýptarprófila, og voru gæði mælinganna mjög mikil, þ.e. litlar eyður í tíma voru í þeim. Óvissa mælinganna er áætluð 0,004 fyrir seltu og 0,005°C fyrir hita (Våge o.fl. 2008).

Dagana 4. til 5. júní 2008 voru gerðar mælingar með straumsjá r/s Árna Friðrikssonar á sniðum sitt hvoru megin við Kolbeinseyjarhrygg, í nágrenni við sondulögnina (21. mynd). Hvort snið var mælt 4 sinnum. Vegna þess hversu lítið var af gruggi/lífi í sjónum náðust aðeins góðar mælingar niður á ~150 m dýpi. Tekið var 5 mínútna meðaltal af straumnum á hverju 16 m dýptarbili sem var síðan brúað yfir á net punkta með jöfnu millibili lóðrétt og lárétt



3. mynd. Snið hita (efri mynd) og seltu (neðri mynd) eftir 69°N í febrúar 2006. Vestasta stöð var tekin á 68°30'N og 18°50'V og komið inn á sniðið á ~16°W. Lóðréttar (svartar) línur sýna staðsetningu stöðva á sniðum.

Figure 3. Temperature (upper panel) and salinity (lower panel) along 69°N in February 2006. The westernmost station is at 68°30'N and 18°50' and into the section at ~16°W. Horizontal, black lines indicate the positions of stations on sections.



4. mynd. Snið hita (efri mynd) og seltu (neðri mynd) eftir 69°N í maí 2006 ofan 600 m dýpis. 4 stöðvar vestast eru á línu frá 66°40N og 18°50 V til 69°N og 16°V vegna íss.

Figure 4. Temperature (upper panel) and salinity (lower panel) along 69°N in May 2006. Temperature (upper) and salinity (lower). The 4 westernmost stations are on a line from 66°40N and 18°50V to 69°N and 16°V due to sea ice.

á og eftir sniðunum. Loks var tekið meðaltal af öllum yfirferðunum og var það gert til að draga úr áhrifum sjávarfalla á niðurstöðurnar en fjórar yfirferðir á hvoru sniði tóku u.þ.b. 24 klst. eða tvær M_2 sjávarfallabylgjur. Samtímis straum-mælingunni voru gerðar hita- og seltumælingar á 7 stöðvum á sniðunum niður á 600 m dýpi.

Niðurstöður

Dreifing hita og seltu.

Hér á eftir fara niðurstöður hita- og seltu-mælinga úr mismunandi leiðöngrum verkefnisins. Endurtekið snið eftir 69°N var nokkurs konar hrygglegja þessara rannsókna, sem lýsir breytileika árstíða í Íslandshafi. Kolbeinseyjar-hryggur liggur um þetta snið á 15-17°V. Lóðréttur ás mynda sýnir dýpi í metrum en á láréttum ás er lengdargráða, nema á myndum sem sýna snið milli Íslands og Jan Mayen, en þar er notuð fjarlægð.

Leiðangur B2-2006, 7.-10.2. 2006.

Vegna hafíss voru vestustu stöðvar á 69°N sniðinu nokkuð sunnan við breiddarbauginn (3. mynd). Vestasta stöð var tekin á 68°30'N og

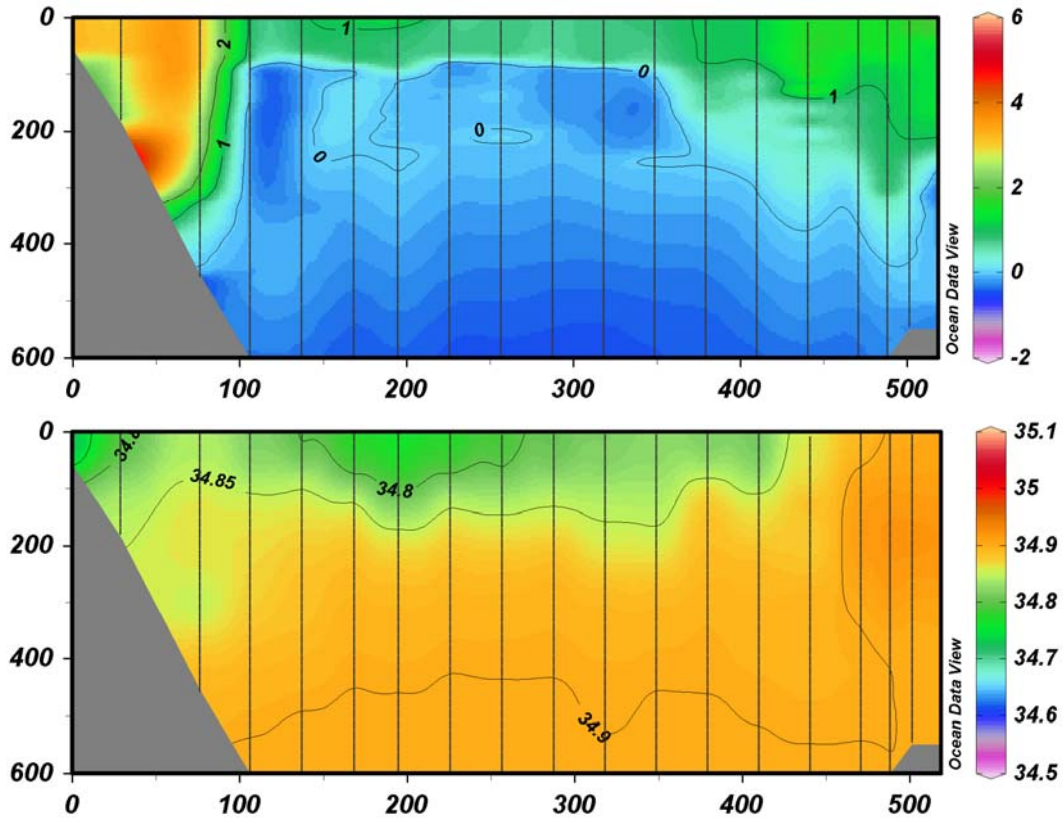
18°50'V og komið inn á sniðið (69°N) á ~16°V. Mynd 3 sýnir hita- og seltusnið niður á 600 m dýpi en mesti breytileikinn var að jafnaði ofan 600 m dýpis. Vestast á þessu sniði var nánast pólsjór í yfirborðslögum niður undir 100 m dýpi. Víðast annars staðar var vetrarblöndun nokkuð einsleit niður á um 200 m dýpi á sniðinu austanverðu.

Leiðangur B4-2006, 18.-26.5. 2006.

Í maí náðist snið eftir 69°N frá 18°50V og austur á Langanes stöð 6 (4. mynd). Pólsjór var áberandi í yfirborðslögum vestan Kolbeinseyjar-hryggjar en tiltölulega lítil lagskipting austanvert í hafinu. Millisjór (1-2°C) var undir pólsjónum vestast á sniðinu. Lítil lagskipting einkenndi sniðið milli Langaness og Jan Mayen sem einnig var tekið í þessum leiðangri (5. mynd).

Leiðangur B6-2006, 10.7-3.8. 2006.

Lárétt dreifing hita og seltu sýnir megin-drættina í sjógerðum að sumarlagi (6. mynd). Innstreymi hlýsjávar úr Noregshafi var merkjanlegt sunnan Jan Mayen. Í sunnanverðu Íslands-



5. mynd. Snið hita (efri mynd) og seltu (neðri mynd) milli Langaness og Jan Mayen í maí 2006 ofan 600 m dýpis.

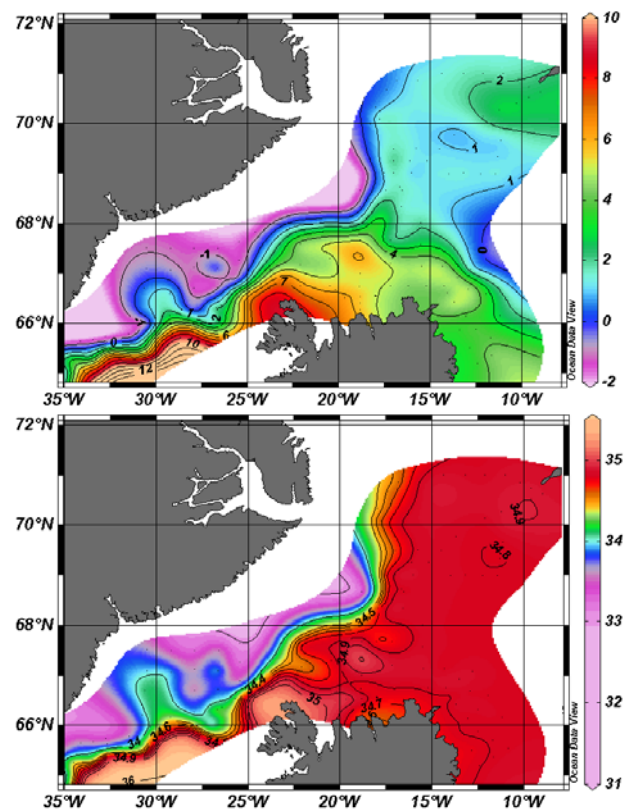
Figure 5. Temperature (upper panel) and salinity (lower panel) on a section between Iceland and Jan Mayen in May 2006.

hafi náði pólsjór úr Austur-Grænlandsstraumi nær Kolbeinseyjarhrygg og landgrunni Íslands en oft áður og er það í samræmi við legu hafssins á athugunarsvæðinu. Skilin við Austur-Íslandsstrauminn norðaustanlands lágu utan við landgrunnsbrún.

Í júlí 2006 var lagskipting orðin nokkuð stöðug austan við Kolbeinseyjarhrygg og hiti yfirborðslaga kominn yfir 6°C í efstu 20 m austanvert á 69°N sniðinu (7. mynd). Vestan við hrygginn var mun kaldara og ferskara í pólsjónum. Almennt sýndu mælingarnar sterk skil milli tiltölulega grunns yfirborðslags og dýpri sjávarlaga líkt og algengt er á þessu hafsvæði. Hafis var nokkuð austarlega á hafsvæðinu miðað við síðari ár og áhrif bræðsluvatns því heldur til að styrkja þessa lagskiptingu ásamt viðvarandi logni á slóðinni.

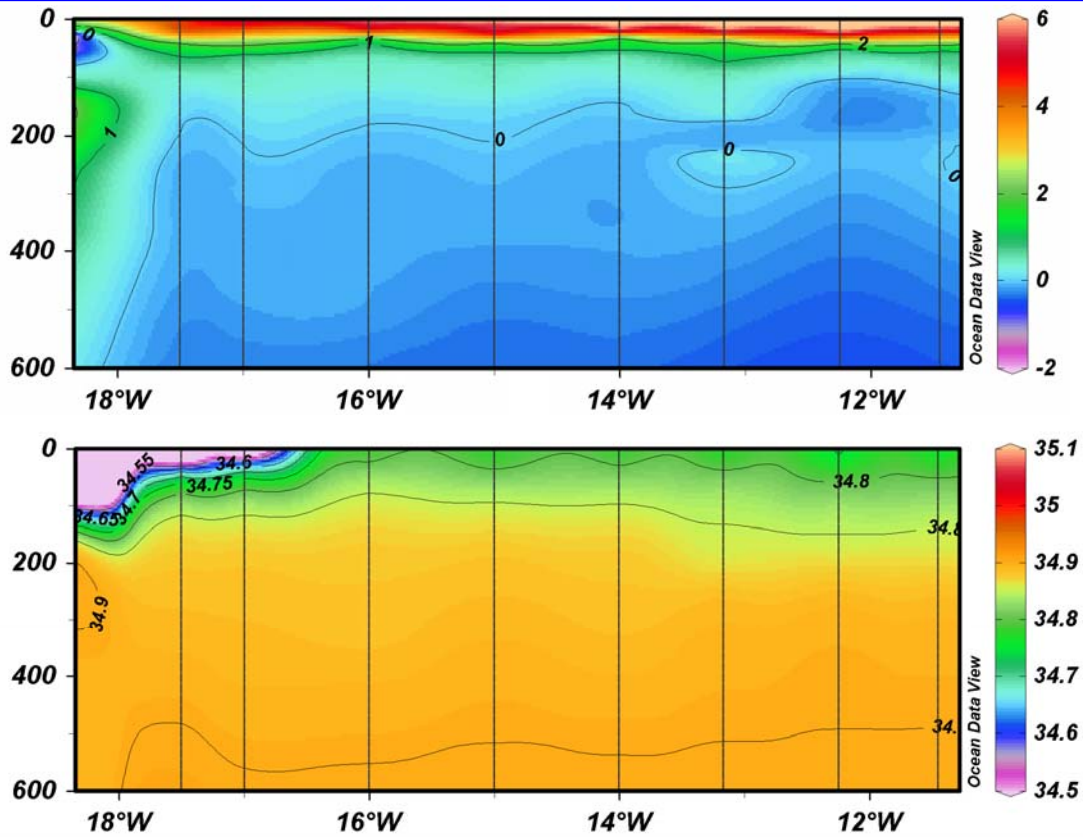
Leiðangur B3-2007, 12.-14.2. 2007.

Ekki var komist á 69°N á vestanverðu sniðinu vegna hafss (8. mynd). Teknar voru stöðvar á línu frá 67°20N og 18°50 V að 69°N og 16°V. Lóðrétt blöndun var að mestu niður fyrir 200 m. Lítil merki sáust um pólsjó eða millisjó.



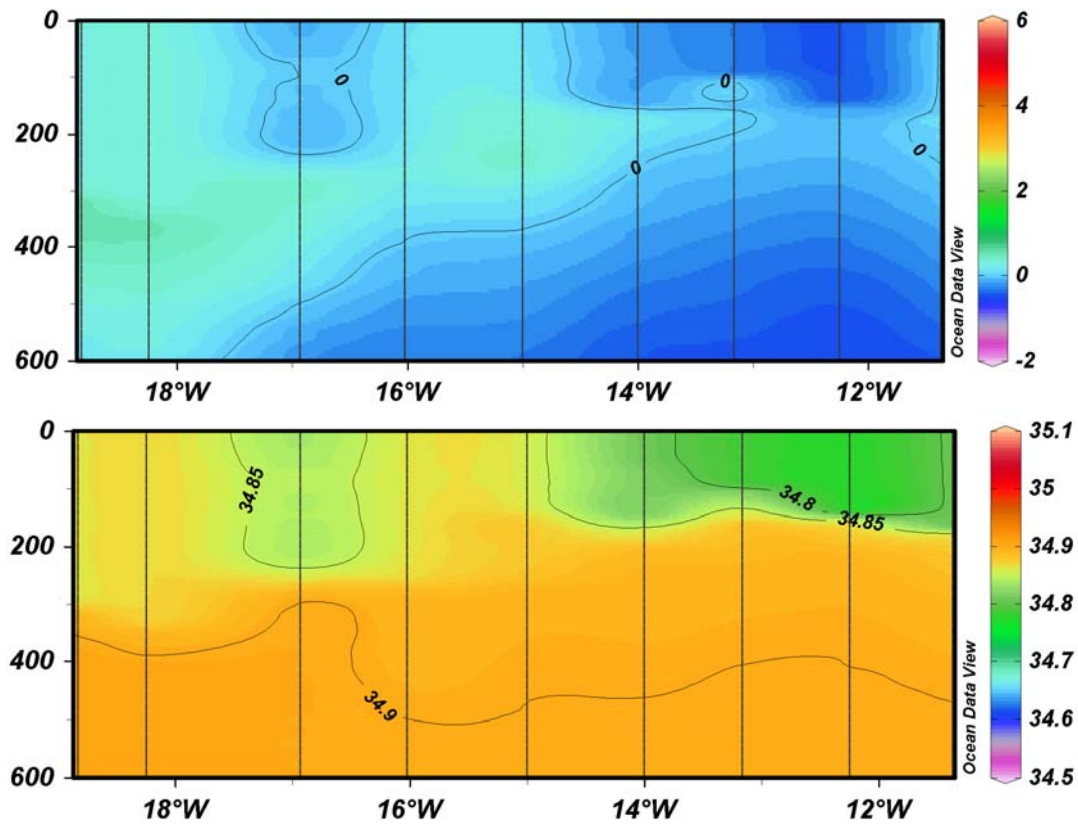
6. mynd. Hiti (efri mynd) og selta (neðri mynd) á 50 m dýpi í leiðangri 10.7 – 3.8. 2006.

Figure 6. Temperature (upper panel) and salinity (lower panel) at 50 m depth July 10th – August 3rd 2006.



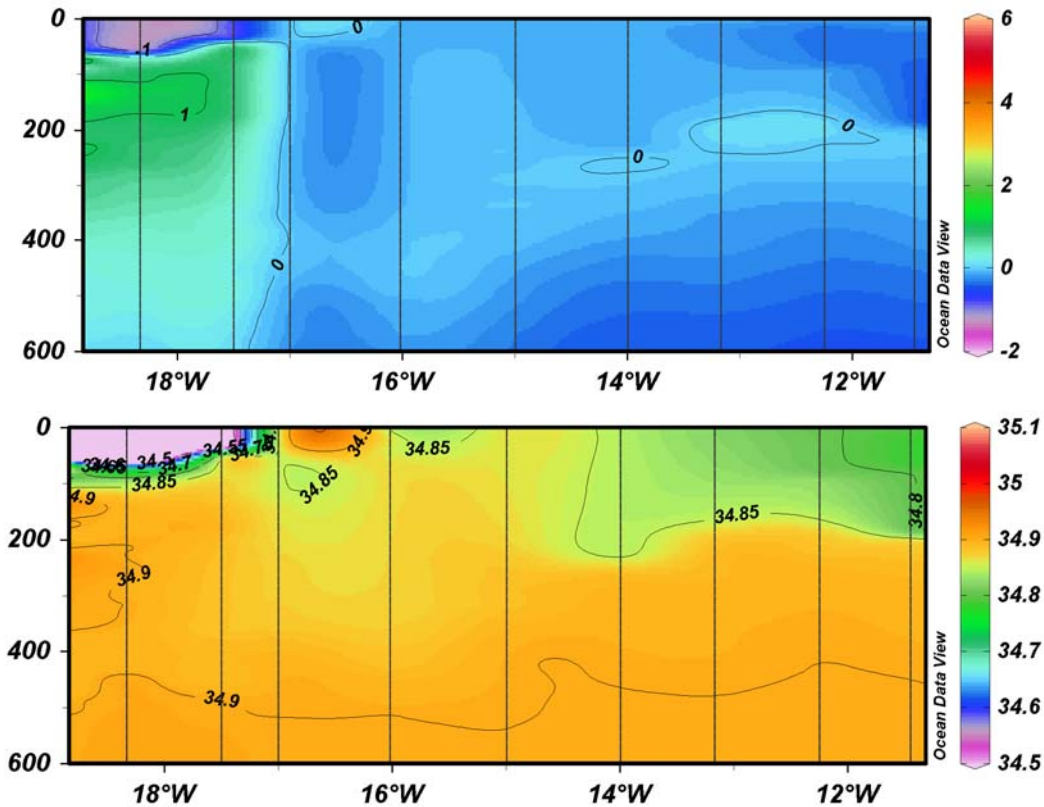
7. mynd. Snið hita (efri mynd) og seltu (neðri mynd) eftir 69°N í júlí 2006 ofan 600 m dýpis.

Figure 7. Temperature (upper panel) and salinity (lower panel) along 69°N in July 2006.



8. mynd. Snið hita (efri mynd) og seltu (neðri mynd) eftir 69°N í febrúar 2007 ofan 600 m dýpis.

Figure 8. Temperature (upper panel) and salinity (lower panel) along 69°N in February 2007.



9. mynd. Snið hita (efri mynd) og seltu (neðri mynd) eftir 69°N í apríl 2007 ofan 600 m dýpis.

Figure 9. Temperature (upper panel) and salinity (lower panel) along 69°N in April 2007.

Leiðangur B6-2007, 19.-24.4. 2007.

Mælingar á sniði eftir 69°N sýndu pólsjó vestast og millisjó undir honum og nánast enga lagskiptingu þar fyrir austan (9. mynd). Skort á lagskiptingu má einnig sjá á sniði milli Jan Mayen og Íslands (10. mynd). Þar sést enn fremur að nokkuð var af hlýsjó sunnan Jan Mayen og að hiti og selta voru í hærra lagi á landgrunninu norðaustan Íslands miðað við árstíma.

Leiðangur B11-2007, 8.-28.8. 2007.

Mælingar á hita og seltu í Íslandshafi í ágúst 2007 sýndu sterk skil (lagskiptingu) milli tiltölulega grunns yfirborðslags og dýpri sjávarlaga eins og mælingar í júlí 2006. Lítil útbreiðsla hafiss og upphitun sólar styrktu þessa lagskiptingu og var þunnt yfirborðslagið tiltölulega heitt, einkum í sunnan- og austanverðu hafinu. Innstreymi hlýsjávar úr Noregshafi var greinilegt sunnan Jan Mayen og voru efri lög sjávar í norðaustanverðu Íslandshafi heldur hlýrri og saltari en oft áður (11. og 12. mynd). Streymi millisjávar úr Norðurhöfum inn í Íslandshaf ($1 < t^{\circ}\text{C} < 3^{\circ}\text{C}$, $s > 34.8$) var tiltölulega heitt og salt og myndaði sterk skil við Austur-Grænlandsstraum (12. mynd). Mælingar

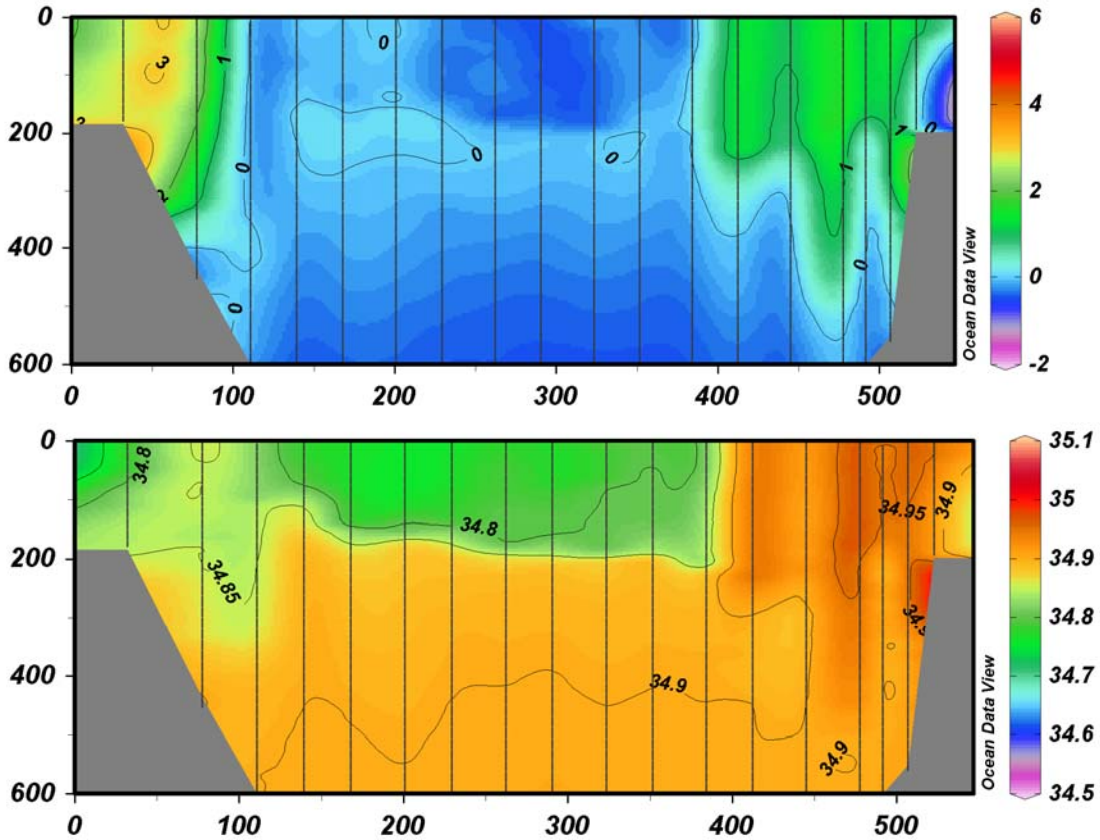
voru gerðar á hita og seltu sjávar á landgrunninu á nokkrum stöðum. Útbreiðsla hlýsjávar norðanlands var töluverð allt norður fyrir landgrunnsbrún, einkum á vestanverðum Norðurmiðum og lágu hitaskil við kalda sjóinn norðar en oft áður í sunnanverðu Íslandshafi. Hiti á landgrunninu norðaustanlands var um meðallag þessa árstíma (11. mynd).

Leiðangur B6-2008, 1.-5.5. 2008.

Efri lög voru uppblönduð og engin merki um lagskiptingu á sniði á 69°N í maí 2008 (13. mynd).

Leiðangur A11-2008, 6.8.-3.9. 2008.

Ástand sjávar var í mörgu svipað í ágúst 2008 og á sama tíma árið áður líkt og lýst var að ofan. Mælingar náðu þó mun norðar árið 2008 og sýndu ákveðnara innflæði sunnan Jan Mayen. Hiti var nú hærri í yfirborðslögum en árið 2007 sérstaklega austanvert í hafinu (14. mynd). Hiti miðdýpis var þó ívið lægri en árið áður, sem getur bent til meiri lóðréttrar blöndunar veturinn 2007 til 2008 en veturinn þar áður. Yfirborðshiti í hafinu austanverðu var nærri 8°C og lagskipting afar sterk. Ferkvatnið í Austur

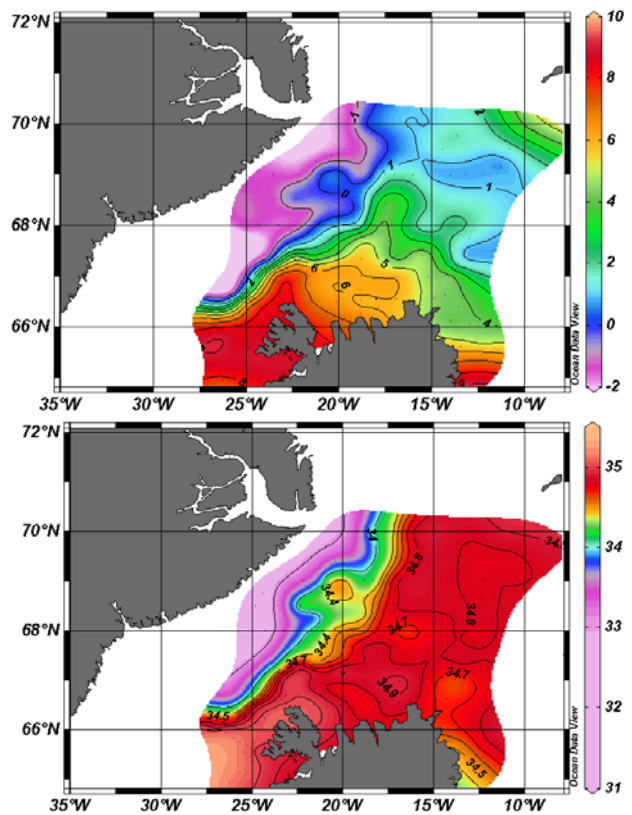


10. mynd. Sníð hita (efri mynd) og seltu (neðri mynd) milli Langaness og Jan Mayen í apríl 2007 ofan 600 m dýpis.
 Figure 10. Temperature (upper panel) and salinity (lower panel) on a section between Iceland and Jan Mayen in May 2006.

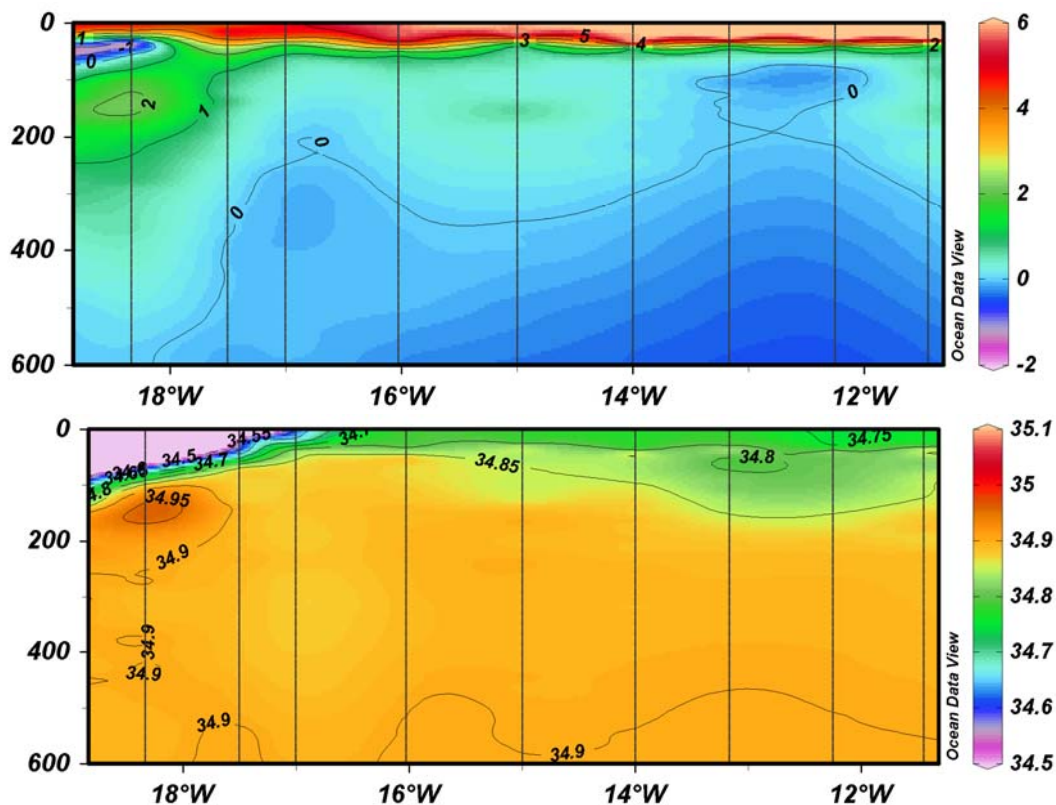
Grænlandsstraumi, vestan við Kolbeinseyjarhrygginn, var mun þynnra en árið 2007 (15. mynd).

Langtímabreytingar

Tímaraðir frá nyrstu stöðvum sem vakaðar eru vegna ástands sjávar á Íslandsmiðum má nota til þess að skoða breytingar í sunnanverðu Íslandshafi og eru það lengstu samfelldu athuganir á hafsvæðinu. Meðalhiti sjávar á dýptarbili 0-150 m úr endurteknum mælingum að sumri og vetri á stöðvum á Látragrunni (Lb4, sbr. 1. mynd), norður af Kögri (Kg4), á Siglu-nessniði (Si8) og nyrst á Langanessniði NA (Lna6) er sýndur á 16. mynd. Á árunum eftir 1995 hlýnaði á þessum stöðvum og vetrarhiti hækkaði nokkuð ákveðið norður af Kögri (16. mynd b). Mismunur á sjávarhita vetrar og sumars bendir til þess að flæði hlýsjávar hafi verið breiðara norður fyrir land um og eftir 1998 en áður var eða, með öðrum orðum, að breytileiki að vetrinum hafi minnkað verulega á þessum stað.

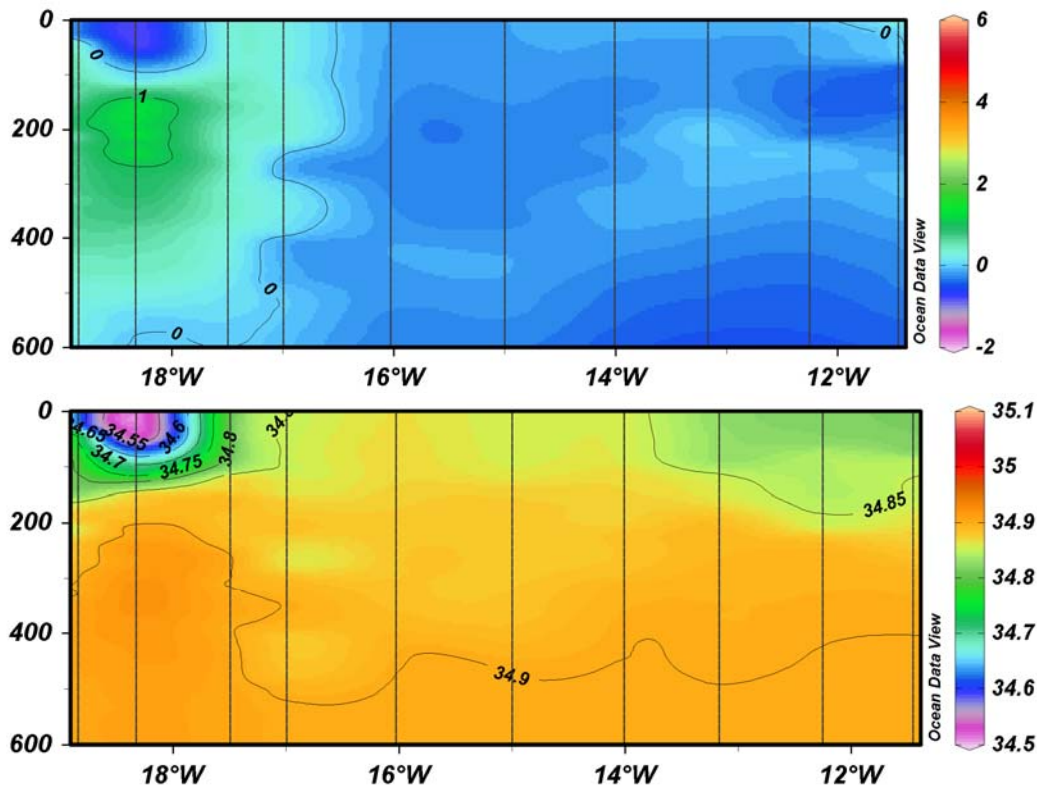


11. mynd. Hiti (efri mynd) og selta (neðri mynd) á 50 m dýpi í leiðangri 8. – 28.8. 2007.
 Figure 11. Temperature (upper panel) and salinity (lower panel) at 50 m depth August 8th. – 28th 2007.



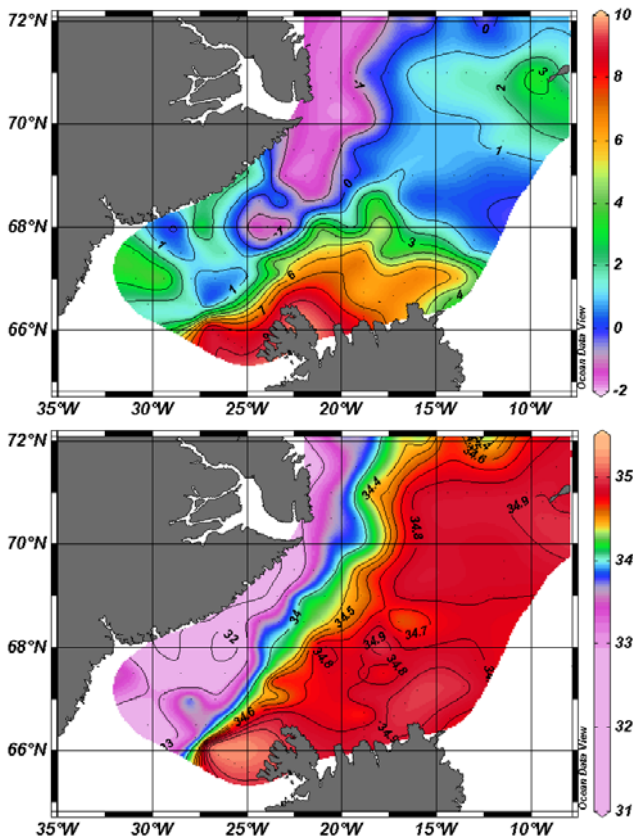
12. mynd. Snið hita (efri mynd) og seltu (neðri mynd) eftir 69°N í ágúst 2007 ofan 600 m dýpis.

Figure 12. Temperature (upper panel) and salinity (lower panel) along 69°N in August 2007



13. mynd. Snið hita (efri mynd) og seltu (neðri mynd) eftir 69°N í maí 2008 ofan 600 m dýpis.

Figure 13. Temperature (upper panel) and salinity (lower panel) along 69°N in May 2008.

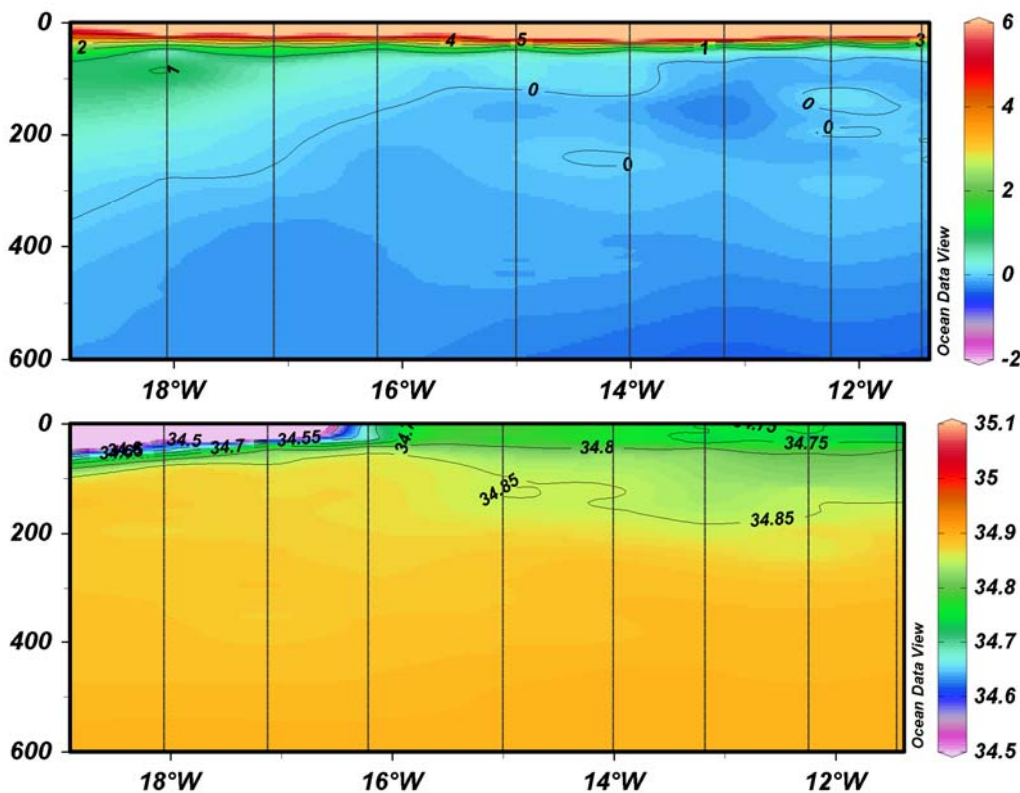


14. mynd. Hiti (efri mynd) og selta (neðri mynd) á 50 m dýpi í leiðangri 6.8. – 3.9. 2008.

Figure 14. Temperature (upper panel) and salinity (lower panel) at 50 m depth August 6th. – September 3rd 2008.

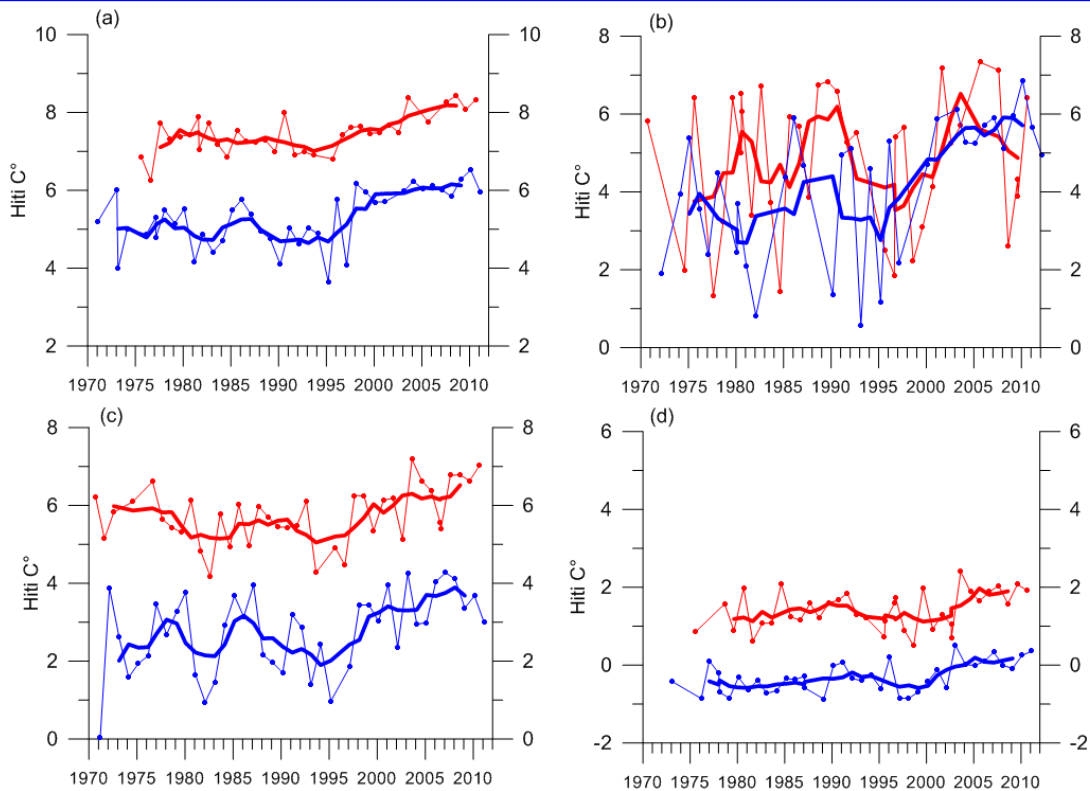
Hiti og selta á stað í vestanverðu Íslandshafi í ágúst mismunandi ár eru sýnd á 17. mynd. Af þeim mælingum má sjá að árin 2007 og 2008 er hiti millisjár nokkru hærri en hin fyrri ár. Millisjórinn (Atlantic Return Water) er hlýr Atlantssjór úr suðri, sem streymir norður eftir Noregshafi en sekkur er hann kemur norður undir Svalbarða og streymir síðan suður í Íslandshaf undir og utan við kaldan og ferskan Austur-Grænlandsstrauminn. Það að millisjórinn hefur verið heitari þessi ár fellur vel að mælingum á svæðinu sunnan Svalbarða á árunum eftir 2000, sem sýndu að hiti þar var í hámarki árið 2006, sem skilar sér í Íslandshaf um ári síðar (Walcovski & Piechura 2011). Ástæða er því til að ætla að bæði hiti og selta hafi hækkað í Íslandshafi á þeim tíma sem athuganir stóðu og uppspretta breytinga (hlýnunar) hafi bæði komið úr suðri og norðri.

Með mælingum klifursondunnar á sunnanverðum Kolbeinseyjarhrygg (21. mynd), fæst einstök mynd af árstíðabreytingum í vatnsúlunni. Á 18. mynd er sýnd dreifing hita, seltu og eðlisþyngdar (σ_t) með tíma. Það verður að hafa í huga að gögn vantar frá efstu 100 metrunum þar sem yfirborðslögin voru ekki mæld. Hitastigið við botn er tiltölulega stöðugt í



15. mynd. Snið hita (efri mynd) og seltu (neðri mynd) eftir 69°N í ágúst 2008 ofan 600 m dýpis.

Figure 15. Temperature (upper panel) and salinity (lower panel) along 69°N in August 2008.

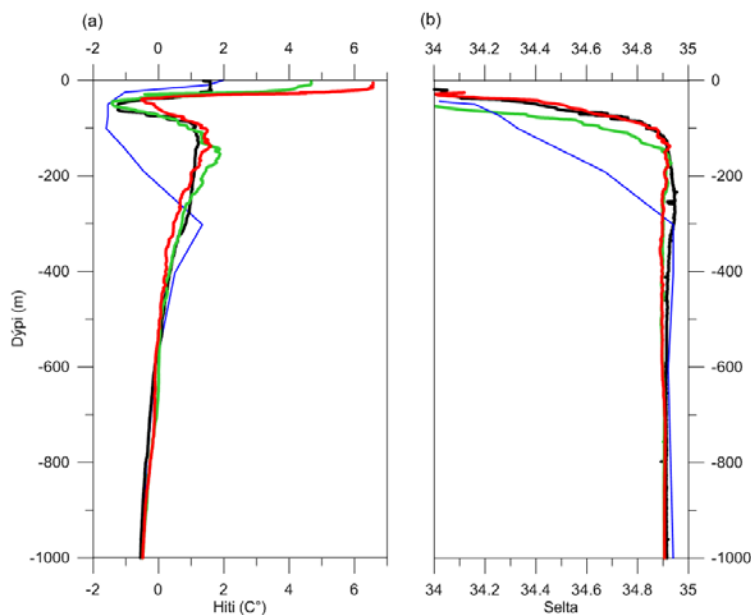


16. mynd. Tímaraðir hita að sumri (rauð lína) og að vetri (blá lína) á fjórum stöðvum við Ísland. a) Látrabjargssnið (lb4), b) Kögursnið (kg4), c) Siglunessnið (sið) og d) Langanessnið norðaustur (lna6). Meðalhiti í vatnssúlunni milli yfirborðs og 150 m dýpis. Sjátakingagögn fyrir 1990 eru brúuð fyrir meðalhita. Staðsetning stöðva er sýnd á 1. mynd (Ólafur K. Pálsson o.fl. 2012).

Figure 16. Time-series of temperature in summer (red line) and winter (blue line) from four repeated hydrography station in Icelandic waters. a) Latrabjarg section (lb4), b) Kögur section (kg4), c) Siglunessection (sið) and d) Langanes NE section (lna6). Averages are taken of temperature in the water column between 0 and 150 m. Water bottle data from before 1990 are interpolated before averaging. Locations of stations are shown in Figure 1 (Ólafur K. Pálsson et al. 2012).

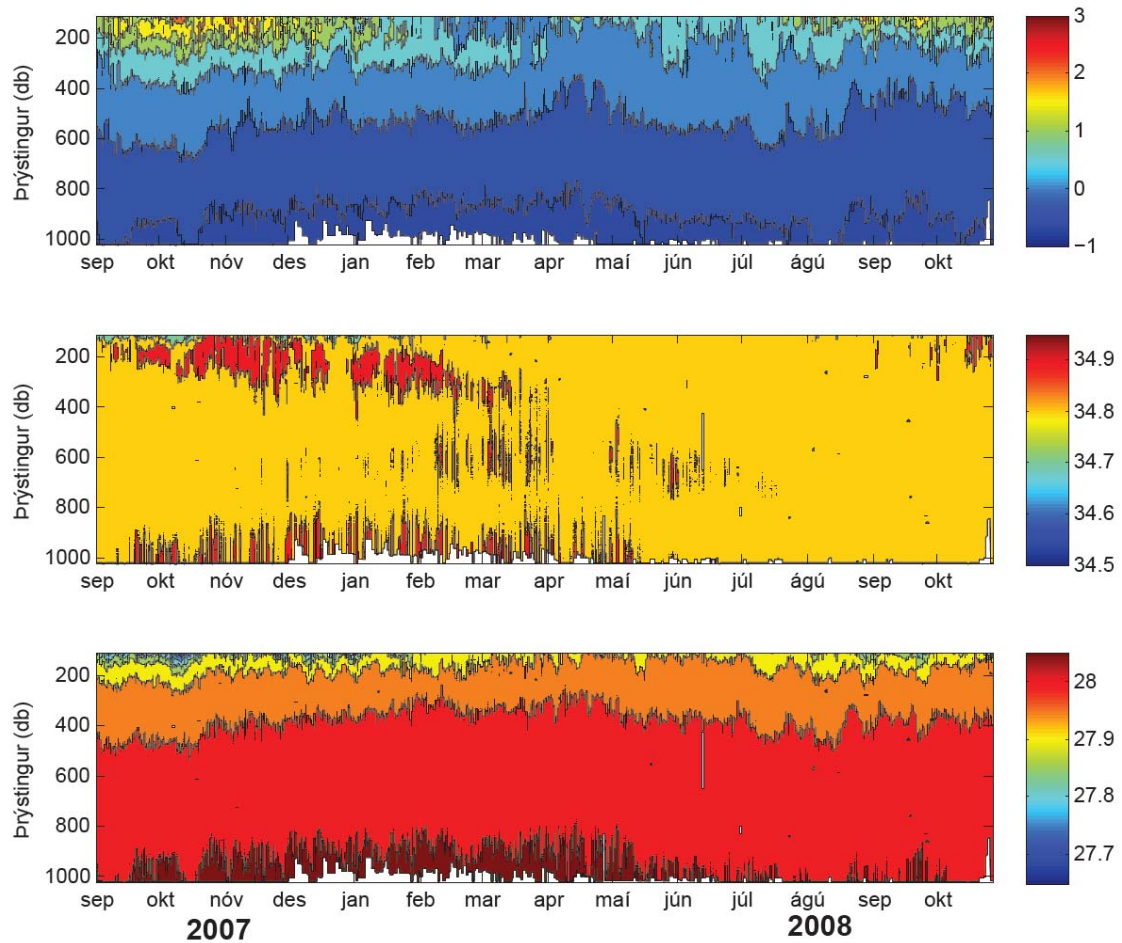
kringum $-0,5^{\circ}\text{C}$ en næst yfirborði nær það hæst 3°C . Í byrjun mælinganna er tölverð lagskipting nálægt yfirborði og niður á 200 m en þar fyrir neðan eru breytingar hægar. Hærra hitastig og selta, sem sést milli 100 og 200 m

dýpis í upphafi, er líklega vegna áhrifa sumarupphitunar. Þessi áhrif dvína síðan eftir því sem líður á veturinn og yfirborðið kólnar og sjórinn blandast niður á æ meira dýpi.

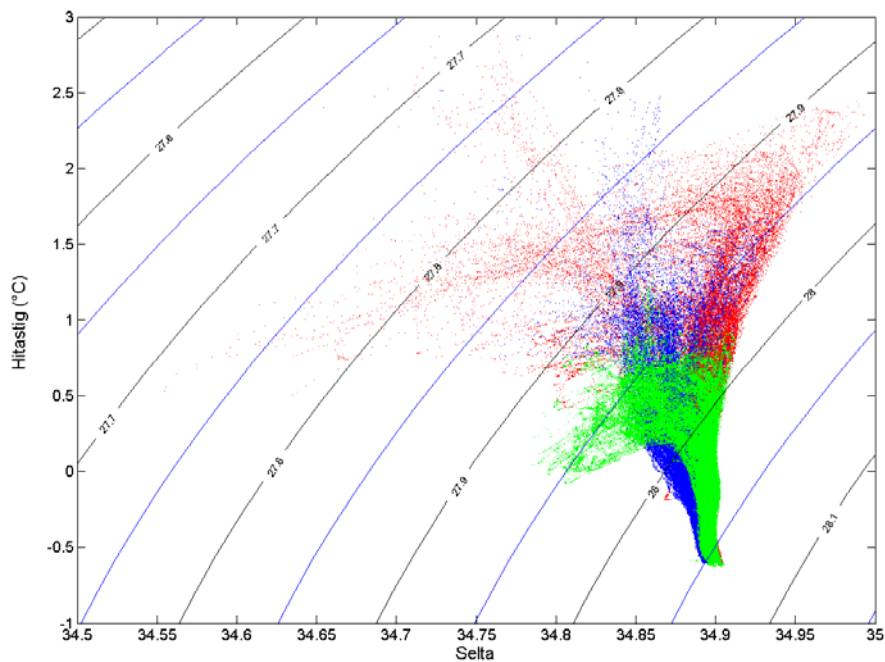


17. mynd. Hiti (a) og selta (b) á stað 69°N og 19°V 17. ágúst 1951 (blátt), 22. september 1987 (svartur), 19. ágúst 2007 (grænt) og 15. ágúst 2008 (rautt). 1951 eru brúuð sjátakingagögn og hin árin eru CTD samfelldar mælingar.

Figure 17. Temperature (a) and salinity (b) at 69°N and 19°V on 17th of August 1951 (blue), 22nd of September 1987 (black), 19th of August 2007 (green) and 15th of August 2008 (red). 1951 are from interpolated water sample data and the others are CTD data.

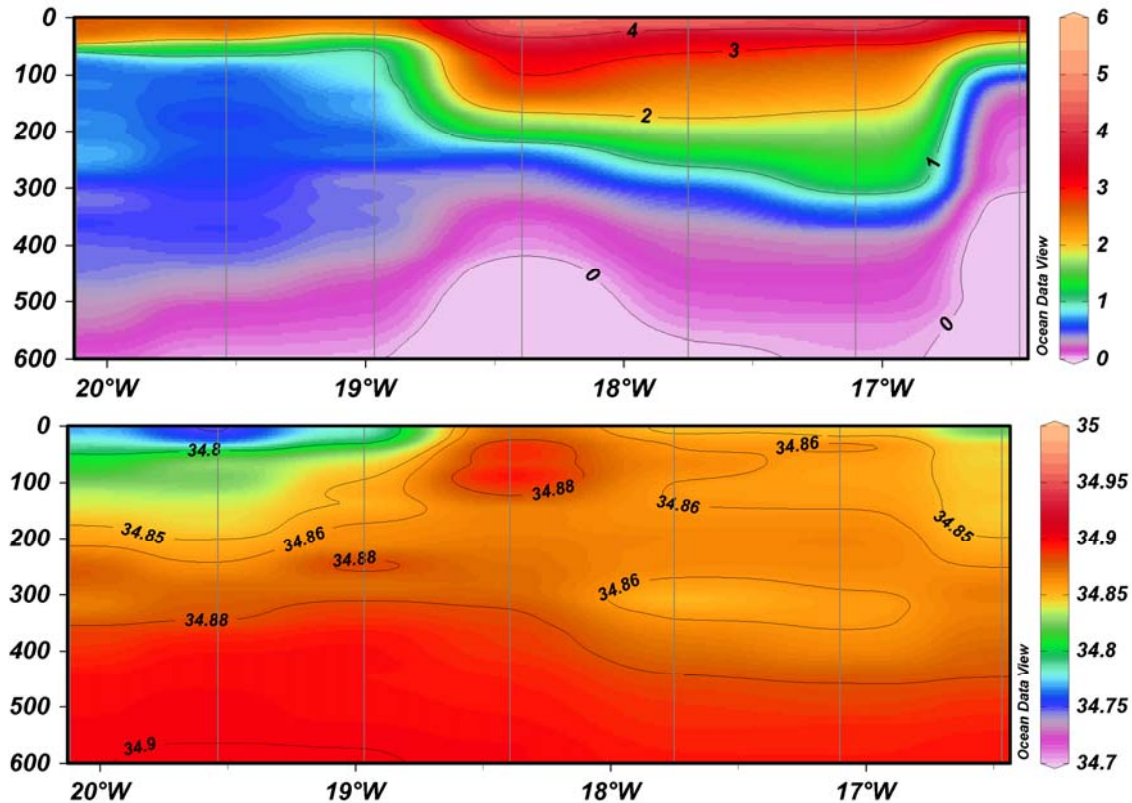


18. mynd. Hiti (efst), selta (miðja) og eðlisþyngdarfrávik (neðst) mælt með klifursondunni.
 Figure 18. Temperature (upper), salinity (middle), and σ_t (lower) derived from the MMP.



19. mynd. T-S (hita-seltu) línurit úr klifursondugögnunum fyrir þrjú mismunandi tímabil. Rauðir punktar eru frá 1 september 2007 til 5 febrúar 2008, grænu punktarnir frá 5 febrúar 2008 til 4 júlí 2008 og bláu punktarnir frá 4 júlí 2008 til 28 október 2008.

Figure 19. T-S diagram from the MMP for three different periods. The red dots are from 1 September 2007 to 5 February 2008, the green dots from 5 February 2008 to 4 July 2008, and the blue dots from 4 July 2008 to 28 October 2008.



20. mynd. Hiti (efri mynd) og selta (neðri mynd) á sniði sem tekið var í júní 2008.

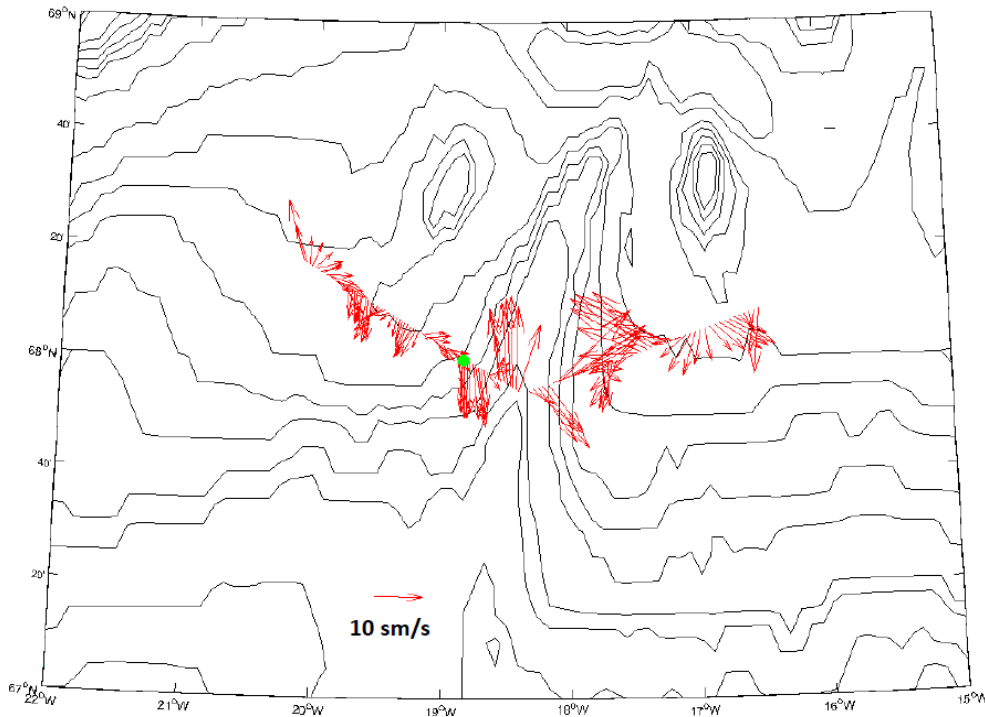
Figure 20. Temperature (upper panel), salinity (lower panel) on the hydrographic section in June 2008.

Á 19. mynd er sýnt T-S línurit með öllum mælingum klifursondunnar, og hefur gögnunum verið skipt í þrennt. Rauðu punktarnir sýna mælingar frá september 2007 til febrúar 2008, þeir grænu frá febrúar til júlí 2008 og þeir bláu frá júlí til október 2008. Augljósustu áhrif Atlantssjávarins eru á tímabilinu september 2007 til febrúar 2008 en þá sést há selta eða yfir 34,91 og allt að 35,0. Á þessu tímabili er einnig til staðar næst yfirborðinu tiltölulega ferskur sjór og lagskipting frekar mikil. Þetta er dæmigert fyrir sumarástand á þessu dýpi, sem vetrarveðrin hafa ekki brotið niður fyrr en í febrúar. Vetrarástand ríkir síðan fram í júlí 2008 (grænir punktar) með lágu hitastigi og lítilli lagskiptingu og óljósu magni Atlantssjávar, sem á þessum árstíma blandast við yfirborðslagið og dregur það úr séreinkennum hans. Eftir þetta fer aftur að gæta augljósra einkenna Atlantssjávar, enda þótt þau séu ekki eins sterk og 2007, og yfirborðslögin hitna.

Á 20. mynd er sýnd hita- og seltudreifing á sniðunum sitt hvoru megin við Kolbeinseyjahrygg. Vestan megin er tiltölulega lítið saltur sjór í yfirborðslagi og sumarupphitun er hafin þar. Undir þessu yfirborðslagi er síðan um 500 m þykkt lag með hitastig milli 0 og 1°C og seltu

á bilinu 34,8-34,9. Yfir miðjum hryggnum er kjarni af tiltölulega söltum og hlýjum sjó niður á 150 m dýpi. Þessi sjór á uppruna sinn í Atlantssjó sem streymir inn í Norðurhöf um Grænlandssund (Steingrímur Jónsson & Héðinn Valdimarsson 2012a). Þetta er hægt að fullyrða þar sem ekki er um aðra uppsprettu að ræða fyrir sjó með þessa eiginleika. Þetta er í samræmi við strauminn sem mældist með straumsjánni en hún sýndi flæði til norðurs (10 cm/s) á þessum stað (21. mynd). Austan við hrygginn er töluvert af tiltölulega hlýjum sjó niður á 200-300 m dýpi og jafnhitalínurnar liggja dýpra þar. Þetta bendir til þess að þarna sé hvirfill sem er u.þ.b. 60 km í þvermál og snýst réttsælis austan við hrygginn. Þessi hvirfill er einnig sjáanlegur í straumsjármælingunum. Austan við hvirfilinn rís 0°C jafnhitalínan upp á 100 m dýpi, sem sýnir að þar tekur við stóri hvirfillinn sem er í austanverðu Íslandshafi, en hann snýst rangsælis.

Ef skoðuð eru önnur snið frá 68°N kemur svipuð mynd í ljós. Á 23. mynd er sýnt snið frá ágúst 2008 og sést þar kjarni með seltu yfir 35 á svipuðum stað yfir hryggnum og í júní 2008. Þessi sjór er Atlantssjór á norðurleið. Einnig er sjáanlegur réttsælis hvirfill austan við hrygginn,



21. mynd. Meðaltal straums frá yfirborði niður að ca. 150 m dýpi mælt með straumsjá um borð í Árna Friðrikssyni í júní 2008. Sondugögnum var safnað á sömu sniðum í júní 2008. Græni punkturinn sýnir staðsetningu klifursondunnar.

Figure 21. The current averaged over the uppermost seven bins, i.e. down to about 150 m, as measured with the vmADCP in June 2008. The CTD sections in June 2008 were taken along the same sections. The green dot indicates the position of the

sem sést m.a. í eðlisþyngdardreifingunni, en í hvirflinum miðjum liggja jafneðlisþyngdarlínurnar neðar (dýpra) en beggja vegna hans.

Straumar

Á 21. mynd eru sýndar straumsmælingarnar þar sem meðaltal er tekið yfir 7 efstu dýptarbilin eða niður á 150 m dýpi. Þar sést að rétt vestan við hrygginn er straumur 10-15 cm/s til norðurs á um 20 km beltí, en vestan þess snýst straumurinn snögglega til suðurs með 10-15 cm/s hraða. Austan við hrygginn er réttsælis straumur í hvirfli sem er um 60 km í þvermál og er straumhraðinn í honum 10-15 cm/s. Straumsjáin sýnir að straumurinn er að mestu óháður dýpi allavega niður á 150 m dýpi. Það er einnig niðurstaðan frá straumhraða sem klifursondan mældi sem sýnir að straumurinn er að mestu óháður dýpi niður á 1000 m (Steingrímur Jónsson & Héðinn Valdimarsson 2012b).

Mælingarnar sem hér er greint frá gefa til kynna að flæði Atlantssjávar til norðurs meðfram Kolbeinseyjarhrygg sé stöðugt.

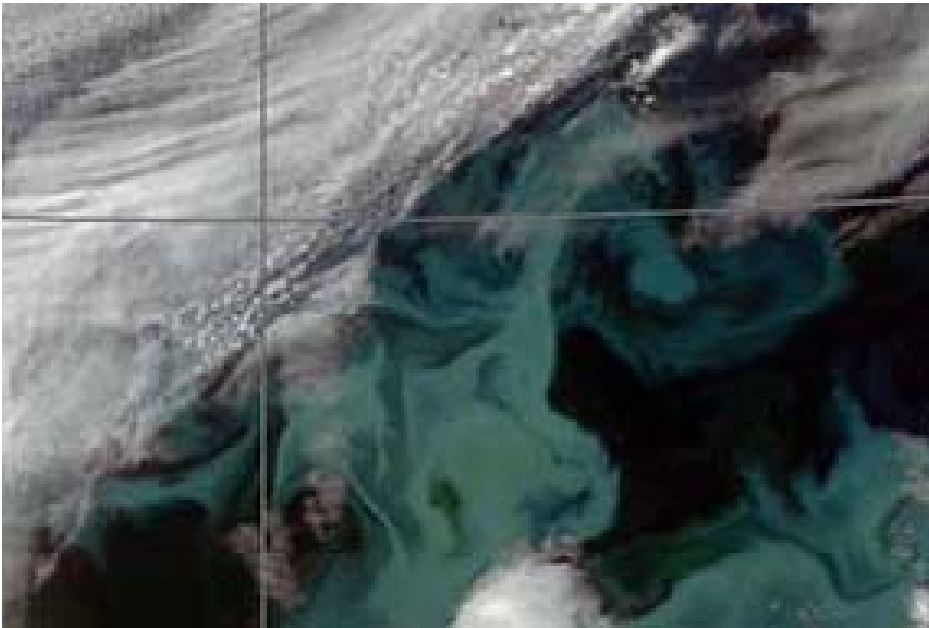
Í ágúst 2008 sást kalkþörungablómi sem dreifðist frá íslenska landgrunninu til norðurs meðfram Kolbeinseyjarhryggnum langt norður fyrir 68°N (22. mynd, Hafsteinn G. Guðfinnsson o.fl. 2009) en það bendir til streymis

Atlantssjávar þessa leið. Einnig má sjá á þeirri mynd að hvirfill, sem snýst réttsælis austan við Kolbeinseyjarhrygg, er um 60 km í þvermál. Það er í samræmi við straumsmælingarnar sem þó voru gerðar á öðrum tíma. Þessi hvirfill sést einnig á sondusniðum sem tekin hafa verið á þessu svæði. Það er því góð ástæða til að ætla að hvirfillinn sé ekki tímabundið fyrirbæri heldur sé hann yfirleitt til staðar.

Umraða

Mælingar á ástandi sjávar í sunnanverðu Íslandshafi frá 1970 sýna tiltölulega öra hlýnun sjávar um síðustu aldamót, einkum þó á síðustu árum síðustu aldar, en fremur stöðugt ástand síðustu 10 árin eða svo. Einkum hækkaði vetrarhiti nokkuð ákveðið. Mælingar í miðju Íslandshafi sýna hlýrri millisjó (Return Atlantic Water) árin 2007 og 2008 en árin 1951 og 1987. Enda þótt þessi hlýnun virðist ekki vera mjög afgerandi í Íslandshafi er hún samanlagt engu að síður sá umhverfisþáttur sem einna mestum beytingum hefur tekið á síðustu árum og gæti því verið sá þáttur sem skýrir, að einhverju marki, breytingar í lífsögu loðnustofnsins á sama tíma.

Straummælingar á sunnanverðum Kolbeins-

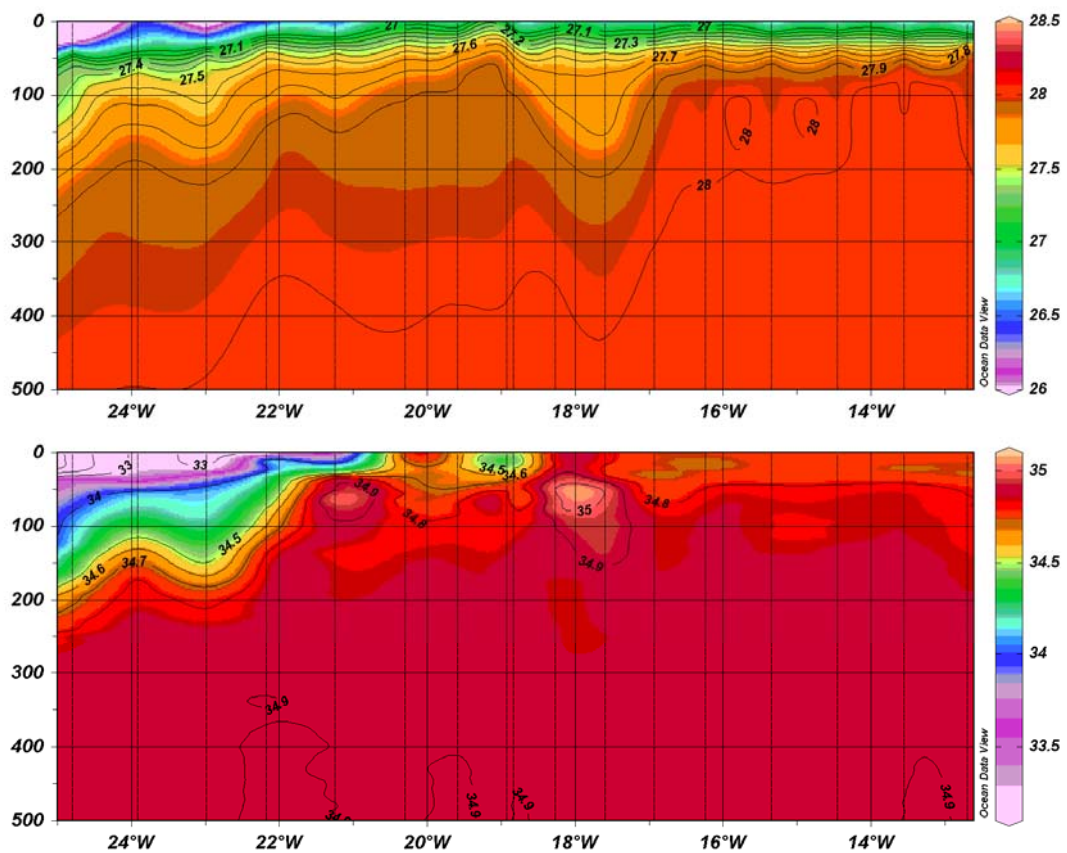


22. mynd. Útbreiðsla kalksviþþörunga 10. ágúst 2008 (MODIS Rapid Response Project of NASA/GSFC; efir Hafsteinn G. Guðfinnsson o.fl. 2009).

Figure 22. Distribution of a coccolithophore bloom on 10 August 2008 (image courtesy of the MODIS Rapid Response Project of NASA/GSFC; after Hafsteinn G. Guðfinnsson et al., 2009).

eyjarhrygg hafa leitt í ljós tvo mjög áhugaverða þætti í sjófræði þessa svæðis, þ.e. annars vegar norðlægan straum rétt vestan við hrygginn og hins vegar réttsælis straumhvirlaust austan við hrygginn. Þessi straumur, og styrkur hans, gæti gengt lykilhlotverki í flutningi lirfa og seiða loðnu, þorsks og annarra fiska inn í Íslandshaf

og þannig haft áhrif á útbreiðslu og afkomu árganga. Straumhvirlinn gæti gengt hlutverki sem uppeldisstöð, enda eru slíkir hvirflar oft taldir ákjósanlegir staðir fyrir egg og lirfur fiska þar sem þau geta hringsólað í hvirflinum en berast ekki burt af svæðinu með straumum. Í þessu sambandi má nefna að í Íslandshafs-



23. mynd. Hiti (efst), eðlisþyngdarfrávik (miðja) og selta (neðst) á sniði sem tekið var í ágúst 2008.

Figure 23. Temperature (top), σ_t (middle), and salinity (bottom) on the hydrographic section in August 2008.

leiðöngurum að hausti árin 2007-2008 voru loðnuseiði áberandi á sunnanverðum Kolbeinseyjarhrygg (Ólafur K. Pálsson o.fl. 2009). Tilvist þessara fyrirbæra á sunnanverðum Kolbeinseyjarhrygg kallar á vistfræðilegar rannsóknir á virkni þeirra og hugsanlegum þætti í þeim breytingum sem átt hafa sér stað í lífsögu ýmissa fiska, t.d. loðnu og þorsks, á undanförunum árum.

Heimildir

- Blindheim, J. & Østerhus, S. 2005. The Nordic Seas: Main oceanographic features. The Nordic Seas: An Integrated Perspective, AGU Monograph Series, Vol 158, 370 bls.
- Hafsteinn G. Guðfinnsson, Sólveig Ólafsdóttir & Ingibjörg Jónsdóttir 2009. Kalkþörun-gaflekkur norðanlands í ágúst 2008. *Haf-rannsóknastofnunin. Fjölrit* nr. 145: 60–65.
- Karl Gunnarsson 1980. Hafsbotninn umhverfis Ísland. Orkustofnun jarðhitadeild, OS80025/JHD14, 79 bls.
- Ólafur K. Pálsson, Héðinn Valdimarsson, Sólveig R. Ólafsdóttir, Hafsteinn G. Guðfinnsson, Ástþór Gíslason, Hildur Pétursdóttir, & Sveinn Sveinbjörnsson 2009. Rannsóknir á vistkerfi Íslandshafs og vistfræði loðnu að sumarlagi. *Hafrannsóknastofnunin. Fjölrit* nr. 145: 54–59.
- Ólafur K. Pálsson, Ástþór Gíslason, Hafsteinn G. Guðfinnsson, Björn Gunnarsson, Sólveig R. Ólafsdóttir, Hildur Pétursdóttir, Sveinn Sveinbjörnsson, Konrad Thorisson & Héðinn Valdimarsson 2012. Ecosystem structure in the Iceland Sea and recent changes to the capelin (*Mallotus villosus*) population. *ICES Journal of Marine Science*, doi: 10.1093.
- Steingrímur Jónsson & Héðinn Valdimarsson 2012a. Water mass transport variability to the north Icelandic shelf, 1994–2010. *ICES Journal of Marine Science* 69(5): 809-815.
- Steingrímur Jónsson & Héðinn Valdimarsson 2012b. Hydrography and circulation over the southern part of the Kolbeinsey Ridge. *ICES Journal of Marine Science*; doi:10.1093.
- Unnsteinn Stefánsson, 1962. North Icelandic Waters. *Rit Fiskideildar* 3: 1-269.
- Unnsteinn Stefánsson, 1999. Hafið, *Háskólaútgáfan*, 480 bls.
- Våge, K., Pickart, R. S., Moore, G. W. K. & Ribergaard, M. H. 2008. Winter mixed layer development in the central Irminger Sea: the effect of strong, intermittent wind events. *Journal of*

Physical Oceanography 38: 541–565.

- Våge, K., Pickart, R. S., Spall, M. S., Héðinn Valdimarsson, Steingrímur Jónsson, Torres, D. J., Østerhus, S. & Eldevik, T. 2011. Significant role of the North Icelandic Jet in the formation of Denmark Strait overflow water. *Nature Geoscience* 5 pp. doi:10.1038/NGEO1234.
- Walczowski, W. & Piechura, J. 2011. Influence of the West Spitsbergen Current on the local climate. *International Journal of Climatology* 31: 1088-1093.

Svæðatengdur styrkur og nýting næringarefna í Íslandshafi

Sólveig R. Ólafsdóttir

Hafrannsóknastofnunin

Ágrip

Sólveig R. Ólafsdóttir 2012. Svæðatengdur styrkur og nýting næringarefna í Íslandshafi. Hafrannsóknir nr. 164. Verkefninu um vistfræði Íslandshafs var ætlað að bæta þekkingu á stöðu loðnustofnsins og tengslum hans við vistfræðilega þætti. Gögnum um styrk næringarefna (níturat, fosfat og kísill) var safnað í 8 leiðöngrum í Íslandshafi og á aðliggjandi hafsvæðum á árunum 2006, 2007 og 2008. Leiðangrar voru farnir á öllum árstímum til að fá yfirsýn yfir ársferla næringarefna. Sýni voru tekin úr allri vatnssúlunni, frá yfirborði til botns, en megináhersla var lögð á söfnun úr yfirborðslögum, efstu 200 m. Styrkur og dreifing næringarefna tengdist útbreiðslu sjógerða á öllum árstímum þar sem lægri styrkur köfnunarefnis tengist seltulágum pólsjó. Hámarksstyrkur mældist snemma vors og hafði hann þá aukist frá mælingum í febrúar. Austanvert í Íslandshafi var hámarksstyrkur kísils mjög lágur eða um 4–5 μM . Upptökuhlutföll næringarefna að vori voru ekki þau sömu austan og vestan megin Kolbeinseyjarhryggjarins árið 2006 þar sem mjög hratt gekk á kísilforða vetrarins austan megin. Í júlí og ágúst öll árin var sterk lagskipting á um 30 metra dýpi. Árin 2006 og 2007 gekk níturat ekki til þurrðar í yfirborðslögum norðaustan megin í hafinu þar sem um 4 μM af níturati voru enn til staðar síðsumars, en mun lægri níturat styrkur mældist þar 2008. Kísilstyrkur var mjög lágur að sumarlagi í efstu 50 metrunum austan megin í Íslandshafi eða < 0,5 μM að jafnaði öll árin. Kísilstyrkur austan megin í Íslandshafi var svo lágur að hann setur takmarkanir á ársframléiðni kísilþörunga. Greinilegur munur var á styrk, dýptardreifingu og upptökuhlutföllum næringarefna í yfirborðslögum austan og vestan megin í Íslandshafi.

Abstract

Sólveig R. Ólafsdóttir 2012. Regional distribution and uptake of nutrients in the Iceland Sea. Marine Research in Iceland no. 164. The project on the ecology of Iceland Sea was intended to improve knowledge of the status of the capelin stock and its relation to ecological factors. Data on inorganic macronutrients (nitrate, phosphate and silicate) was collected on 8 cruises in the Iceland Sea and adjacent waters in 2006, 2007 and 2008. The cruises were conducted on all seasons to study the seasonal changes in nutrient concentrations. Samples were taken from the entire water column with special emphasis on the surface layers. The nutrient concentration and

distribution patterns had linkages to water mass distributions on all seasons where lower surface nitrate concentrations correlated to low salinity Polar water. The annual maxima in nutrient concentrations were observed in early spring where an increase was seen from the February measurements. In the gyre in the eastern part of the Iceland Sea the winter maxima in silicate was low or about 4–5 μM . The uptake ratio of nutrient in spring 2006 differed along a section on 69°N where more rapid uptake of silicate was observed on the eastern part of the section, to the east of the Kolbeinsey Ridge. In July and August all years a strong stratification was on approximately 30 m depth. In 2006 and 2007 nitrate was not fully depleted in the surface layers in late summer in the north eastern part of the area where up to 4 μM nitrate were found. In 2008 the concentrations were much lower. Silicate concentrations in the top 50 meters in late summer in the eastern part of the Iceland Sea were very low or < 0.5 μM in all years. These low silicate concentrations set a limit to the production of diatoms. A statistically significant difference in nutrient concentrations, profiles and uptake ratios in the surface layer was found between eastern and western parts of the Iceland Sea.

Inngangur

Íslandshaf sem afmarkast af Grænlandi í vestri, Jan Mayen hrygg austri, Jan Mayen í norðri og Íslandi í suðri, einkennist af miklum breytileika í yfirborðssjógerðum. Botnlögun þar sem Kolbeinseyjarhryggur skiptir hafinu í eystri og vestari kvos hefur mikil áhrif á dreifingu sjógerða. Kolbeinseyjarhryggur deilir Íslandshafi í tvö dýpi, mesta botndýpið er um 2000 m austan megin hryggjarins en hámarksdýpi vestanmegin er 1600–1700 m. Í Íslandshafi blandast margar sjógerðir. Neðan um 400 m dýpis norðan Íslands er botnsjór Norðurhafs með seltu um 34,9 og hita < 0°C. Ofan botnsjárvarins, og í austurhlutanum oft allt til yfirborðs, er millisjór Norðurhafs með seltu, S > 34,7 og hita > 0°C. Í yfirborðslögum, sem hér er einkum fjallað um, gætir syðst hlýsjávar (Atlantssjávar) sem flæðir að vestan inn á Norðurmið og ber varma og næringarefni. Vestast, í Austur Grænlandsstraumi er hafís og Pólsjór, kominn norðan úr Íshafi með seltu <

34,4 og hita sem er frá frostmarki, $< -1,5$ og að 3-4 °C á sumrin. Í austurhlutanum (Austur Íslandsstraumi) er yfirleitt svalsjór með vetrarhita 1-3°C og seltu 34,6–34,9 eða jafnvel fyrrnefndur millisjór. Vegna ólíkra eiginleika sjógerðanna sem er að finna í yfirborðslögum Íslandshafs verða aðstæður þar breytilegar. Sterkust lagskipting tengist yfirleitt lagseltu-áhrifum Pólsjávar og hæstur hiti áhrifum Atlantssjávar. Sjógerðirnar eru misjafnar hvað hámarksstyrk næringarefna varðar og því misvænlegar til að standa undir hárrí frjósemi þeirra svæða sem þær þekja (tafla 1), og útbreiðsla þeirra er breytileg milli ára. Einnig er breytileiki í stöðugleika vatnssúlunnar við yfirborð og kann það að hafa áhrif á tímasetningu vorblóma og heildarfrumframleiðni á ársgrundvelli. Eins og alls staðar á háum breiddargráðum breytist styrkur næringarefna í yfirborðslögum sjávar í Íslandshafi reglulega með árstíma og er það afleiðing af bæði lífrænum og eðlisfræðilegum ferlum. Styrkurinn er hæstur við hámark vetrarkælingar og lóðrétrar blöndunar þegar vetrarmyrkur hamlar ljóstillífun. Dýpt blandaða lagsins við yfirborð er því mest um hávetur þegar þörungagróður er nánast enginn en minnkar síðan að vorlagi með hækkandi sól og þegar hitaskiptalag myndast, eða þar sem sjór með lága seltu og eðlisþyngd er við yfirborð.

Styrkur næringarefna í lok vetrar sem er sá forði sem plöntusvifi stendur til boða við upphaf framleiðinnar er breytilegur eftir sjógerðum og jafnframt háður dýpt blandaða lagsins að vetrarlagi (tafla 1).

Sá hluti framleiðinnar sem byggir á vetrarforða næringarefnanna er kallaður nýframleiðni (“new production” til aðgreiningar frá “recycled production”) (Dugdale & Goring 1967) og einungis hún skiptir máli fyrir brottflutning kolefnis frá yfirborðslögum (biological pump). Fyrir Íslandshaf má útskýra um 65% breytileikans í vetrarstyrk nitrats með breytingum á

dýpt blandaða lagsins (Jón Ólafsson 2003). Dýpt blandaða lagsins að vetri er háð veðurfarslegum aðstæðum hverju sinni, kælingu og vindum. Svífisamfélög og framleiðni geta þeirra eru talin sýna viðbrögð við breytingum á framboði köfnunarefnis í efri lögum sjávar. Þannig tengjast breytingar á umhverfisskilyrðum framleiðni getunnar.

Frumframleiðni er að jafnaði hærri á landgrunnum heldur en úti fyrir þeim (Longhurst o.fl. 1995). Á háum breiddargráðum vex styrkur næringarefna nærri yfirborði við lóðréttu blöndun að vetrarlagi og standa undir komandi vorblóma. Á eftir þessu fremur stutta framleiðsluferli dregur stöðugleiki yfirborðslagsins úr endurnýjun næringarefnanna við yfirborð neðan frá svo að framleiðnin um sumarið verður oft lág. Frumframleiðni sem er svo skammvinn nýtist oft illa í fæðukeðju uppsjávarins (Sambrotto 2008). Meginhluti þess kolefnis sem flyst úr yfirborðinu er talinn eiga uppruna sinn í vorblómanum (Falkowski o.fl. 2000).

Í Noregshafi hefur verið áætlað að frumframleiðnin sé 80 g C m⁻² (Rey 2004) og að hlutfall nýframleiðni sé um 60% af því. Þó hefur verið bent á (Bathmann o.fl. 1990) að þar sem mikil beit er, eins og í Noregshafi, sé þessi tala lágmark og að raunveruleg nýframleiðni sé enn hærri (Rey 2004) eða allt að 80%. Talið er að svipaðar tölur um frumframleiðni eigi við Íslandshaf (Skogen o.fl. 2007) og að hlutfall nýframleiðni aukist með breiddargráðu frá suðri til norðurs (Rey o.fl. 2000).

Hið lága hitastig í yfirborðslögum Íslandshafs gerir það að verkum að koldíoxíð úr andrúmsloftinu leysist betur upp þar heldur en þar sem yfirborðshitastig er herra. Það leiðir svo til aukningar á koldíoxíðstyrk sjávarins og lækkandi sýrustigs. Vitneskja um hvernig frumframleiðni og kolefnisflæði verður fyrir áhrifum frá mismunandi eðlisfræðilegum skilyrðum á mismunandi árstímum er

Tafla 1. Vetrarstyrkur næringarefna (í μM) í yfirborðslögum (0-100 metrar) í helstu yfirborðssjógerðum í Íslandshafi. Byggt á Unnsteini Stefánssyni og Jóni Ólafssyni 1991 og Sólveigu Ólafsdóttur 2006.

Table 1. Winter nutrient concentrations (μM) in surface layers (0 – 100 meters) in major surface water masses in the Iceland Sea. Based on Unnsteinn Stefánsson and Jón Ólafsson 1991 and Sólveig Ólafsdóttir 2006.

	Atlantssjór	Arktískur sjór	Pólsjór
Nítrat (μM)	14	12	7.5 - 10
Fosfat (μM)	0.95	0.85	0.6 - 0.8
Kísill (μM)	7	5.5	5

naðsynleg til að skilja og gera reiknilíkön af hugsanlegum áhrifum veðurfarsbreytinga sem talið er að verði mikil á norðlægum breiddargráðum.

Þær rannsóknir sem hér er lýst eru hluti af viðamiklu verkefni um vistkerfi Íslandshafs sem hófst árið 2006 og var gagnasöfnun á árunum 2006-2008. Markmið þessarar greinar er að lýsa helstu niðurstöðum úr rannsóknum á næringarefnum í verkefninu.

Efniviður og aðferðir

Sýnum til mælinga á næringarefnum nítítri (NO_3), fosfati (PO_4) og kísli ($\text{Si}(\text{OH})_4$), var safnað á öllum umhverfisstöðvum, allt að 12 sýnum á hverri stöð en 12 sjósýni er hægt að taka í hverri slökun rannsóknatakjanna. Áhersla var lögð á söfnun í yfirborðslögum sjávarins og voru föst sýnatökudýpi 0, 10, 20, 30, 50, 100 og 200 m. Úr neðri hluta vatnsúlunnar var síðan safnað með um 200 m bili en ef botndýpi var meira en 1200 m var söfnunin gisnari. Undantekning var í leiðangri B3-2007 þar sem sýni voru einungis tekin niður á 600 metra dýpi. Á tveimur stöðvum á 69°N austan og vestan megin við Kolbeinseyjarhrygginn voru einnig tekin sýni til mælinga ólífrænu kolefni (bæði heildar ólífrænu kolefni og hlutþrýstingi koldíoxíðs) og súrefni frá yfirborði og til botns. Þá var einnig safnað kolefnis-sýnum á sniði milli Íslands og Jan Mayen í tvígang, í leiðöngum í maí 2006, B4-2006, og í apríl 2007, B6-2007. Niðurstöðum þeirra rannsókna verður ekki lýst hér. Sýnum til ákvörðunar á styrk fosfats, nítítrats (nítírat + nítít) og kísils var safnað í 250 ml polýetylen flöskur (low density polyethylene) sem þvegna voru með þynntri saltsýru fyrir hvern leiðangur. Sýnin eru geymd í kæli fram að mælingu ef mælt er um borð eins og gert var í eftirtöldum leiðöngum: B4-2006, B6-2006, B11-2007 og A11-2007, en fryst strax að söfnun lokinni ef mælingar fóru fram í landi. Í öllum leiðöngum sem farnir voru að vori og sumri (B4-2006, B6-2006, B6-2007, B11-2007, B6-2008 og A11-2007) voru sýni úr yfirborðslöginu, 0 – 60 m síuð með Whatman PURADISC sprautufilter til að forðast áhrif frá svifögnum á blankið (turbidity blank effect) sérstaklega vegna fosfatmælinganna. Sýni frá meira dýpi voru ekki síuð. Til efnagreininga var notaður Chemlab autoanalyzer með 3 rásam og samtímis mælt nítírat, fosfat og kísill. Aðferðirnar voru sam-

kvæmt Grasshoff (1970), nema fyrir fosfat þar sem notuð var aðferð Murphy & Riley (1962), sem aðlöguð var sjálfvirkum efnagreiningaútbúnaði.

Gæðaeftirlit með efnagreiningum

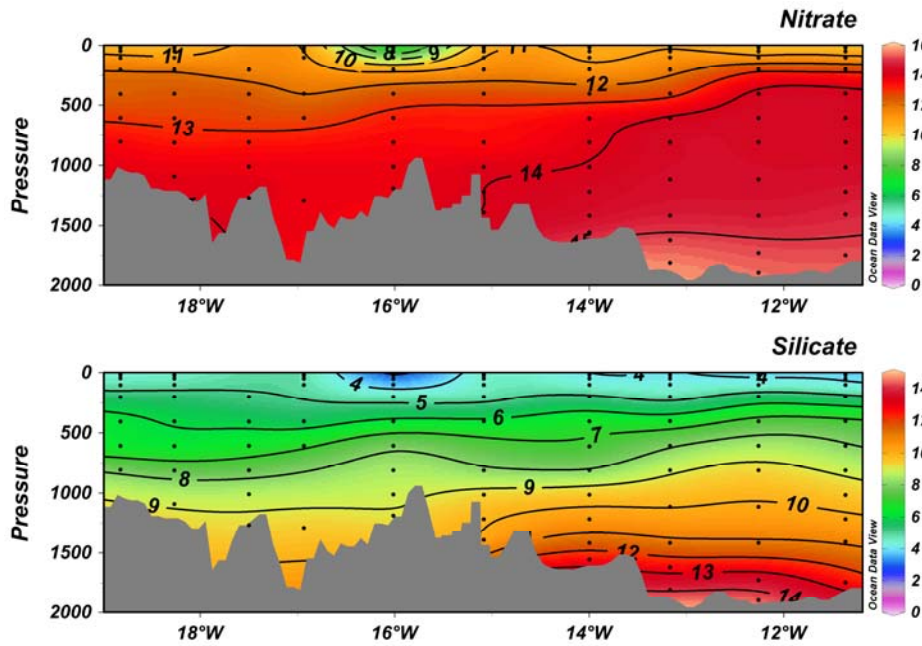
Til að meta nákvæmni (accuracy) efnagreininga á næringarefnum hefur Hafrannsóknastofnunin tekið þátt í QUASIMEME gæðastjórnunarverkefninu frá því 1993. Það felst í því að tvisvar á ári eru mæld viðmiðunarsýni með óþekktum styrk og niðurstöðum skilað og mat lagt á útkomuna (Wells o.fl. 1997). Nákvæmni næringarefnagreininganna er metin sem mismunur greininga á Hafrannsóknastofnuinni annars vegar og uppgefins gildis hins vegar á hverju sýni fyrir sig (Jón Ólafsson o.fl. 2010). Þannig fæst nákvæmni (accuracy) upp á $-0.12 \mu\text{M}$ (standard deviation = $0.16 \mu\text{M}$, $n = 28$) fyrir nítírat, fyrir fosfat er hún $-0.02 \mu\text{M}$ (standard deviation = $0.02 \mu\text{M}$, $n = 28$) og fyrir kísil $-0.11 \mu\text{M}$ (standard deviation = $0.27 \mu\text{M}$, $n = 23$). Samanburður á þessum mismun og hæsta næringarefnastyrk sem mældist í verkefninu gefur minna en 1,5% skekkju fyrir nítírat, 3,5% skekkju fyrir fosfat og 2,5% fyrir kísil. Að auki er viðmiðunarefni búið til á Hafrannsóknastofnuninni (Aminot & Keruel, 1998), sýni af því er mælt samhlið efnagreiningum dag hvern. Á grundvelli þeirra niðurstaðna má áætla breytileikann frá degi til dags og er hann $\pm 0,2 \mu\text{M}$ fyrir nítírat og kísil og $\pm 0,03 \mu\text{M}$ fyrir fosfat.

Flestar myndanna eru unnar með ODV (Schlitzer 2011).

Niðurstöður

Vetur

Í leiðöngum 7.–10. febrúar 2006 og 12.–14. febrúar 2007 voru gerðar mælingar á næringarefnum í Íslandshafi á sniði á 69°N . Sökum íss var ekki hægt að komast norður á 69° vestast á sniðinu (sjá 1. mynd í “Vistkerfi Íslandshafs 2006-2008. Leiðangrar og gagnasöfnun” í þessu hefti). Styrkur næringarefna þessa vetur var hár og frekar einsleitur í efstu 200 metrunum, 1. mynd sýnir lóðrétta dreifingu nítítrats og kísils frá yfirborði til botns í febrúar 2006 og 2. mynd sýnir lóðrétta dreifingu þeirra niður á 600 metra dýpi í febrúar 2007. Í yfirborðslöginu var lítill munur á styrk næringarefna í austur-vestur stefnu á sniðinu árið 2006 (1. mynd) en árið 2007 (2. mynd) var styrkurinn lægri austan megin á sniðinu. Í febrúar 2006 var styrkur

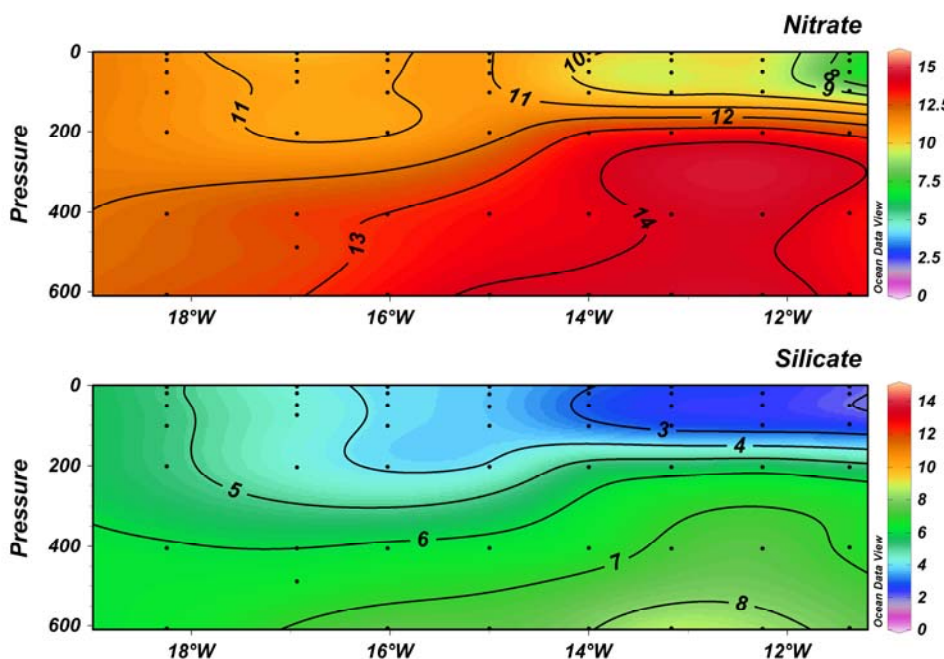


1. mynd. Dreifing nitrats og kísils (μM) á lóðréttu sniði frá yfirborði til botns á 69°N 8. – 9. febrúar 2006. Sökum hafíss voru vestustu stöðvarnar þó sunnan við 69°N . Vestasta stöðin er á $18^\circ 50'$ V og sú austasta á $11^\circ 22'$ V.

Figure 1. Nitrate and silicate (in μM) on a vertical section from the surface to the bottom on 69°N on 8. – 9. February 2006. The westernmost stations lie a little south of 69°N due to sea ice. The westernmost station is at $18^\circ 50'$ W and the easternmost is at $11^\circ 22'$ W.

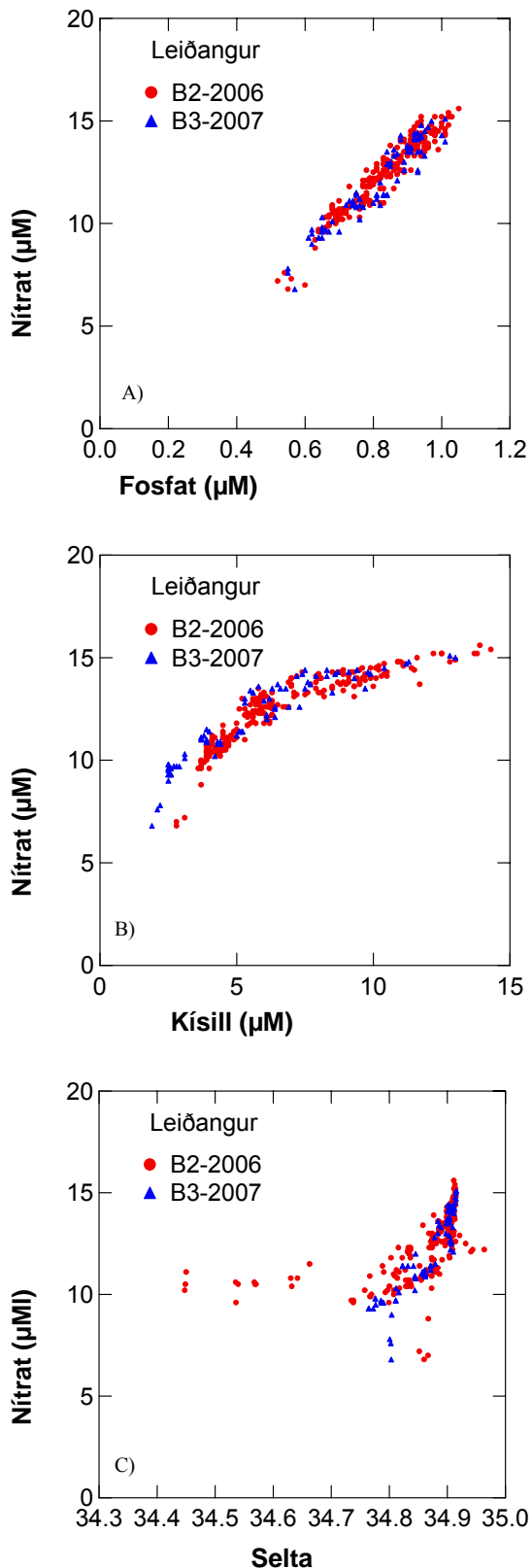
nitrats við yfirborð $>11 \mu\text{M}$ á öllu sniðinu, að undanskildri einni stöð á 16°W þar sem hann var $<8 \mu\text{M}$. Fosfatsyrkur var $0,73\text{--}0,79 \mu\text{M}$ og kísilstyrkur um $5 \mu\text{M}$ vestan megin á sniðinu en $<4 \mu\text{M}$ við yfirborð á sniðinu austanverðu. Á 2. mynd sést að munurinn á vetrarstyrk næringarefna við yfirborð var mun meiri 2007 en 2006 þar sem lægri styrkur var austan megin við Kolbeinseyjarhrygg, munurinn á styrk kísils var $> 2 \mu\text{M}$. Fyrir neðan um 200 m dýpi vex styrkur næringarefna síðan með dýpi en fyrir neðan 500 m dýpi tekur einungis styrkur kísils breytingum sem nokkru nemur. Kísilstyrkur

eykst stöðugt með dýpi en nítrat- og fosfatstyrkur eykst hægar með dýpi. Á um 200 m dýpi er styrkur kísils um $5 \mu\text{M}$ og nítratstyrkur $11\text{--}12 \mu\text{M}$. Á 500 m dýpi er kísilstyrkur $6\text{--}7 \mu\text{M}$ og nítratstyrkur $12\text{--}13 \mu\text{M}$. Hámarksstyrkur kísils er $> 14 \mu\text{M}$ og nitrats $> 15 \mu\text{M}$ við botninn austan megin Kolbeinseyjarhryggjar (1. mynd). Á 3. mynd eru vensl næringarefna frá öllum dýpum sýnd. Sambandið milli styrks fosfats og nitrats (3. mynd a) er línulegt og er lýst með jöfnunni $\text{NO}_3 = 15,48 * \text{PO}_4 - 0,50$ ($n=328$; $r^2=0.91$). Samband kísils og nitrats (3. mynd b) endurspeglar mismunandi endurnýjun



2. mynd. Dreifing nitrats og kísils á lóðréttu sniði frá yfirborði og niður á 600 m á 69°N 12. – 13. febrúar 2007. Sökum hafíss voru vestustu stöðvarnar þó sunnan við 69°N . Vestasta stöðin er á $18^\circ 15'$ V og sú austasta á $11^\circ 22'$ V.

Figure 2. Nitrate and silicate (in μM) on a vertical section from the surface and down to 600 m on 69°N on 12. – 13. February 2007. The westernmost stations lie a little south of 69°N due to sea ice. The westernmost station is at $18^\circ 15'$ W and the easternmost is at $11^\circ 22'$ W.



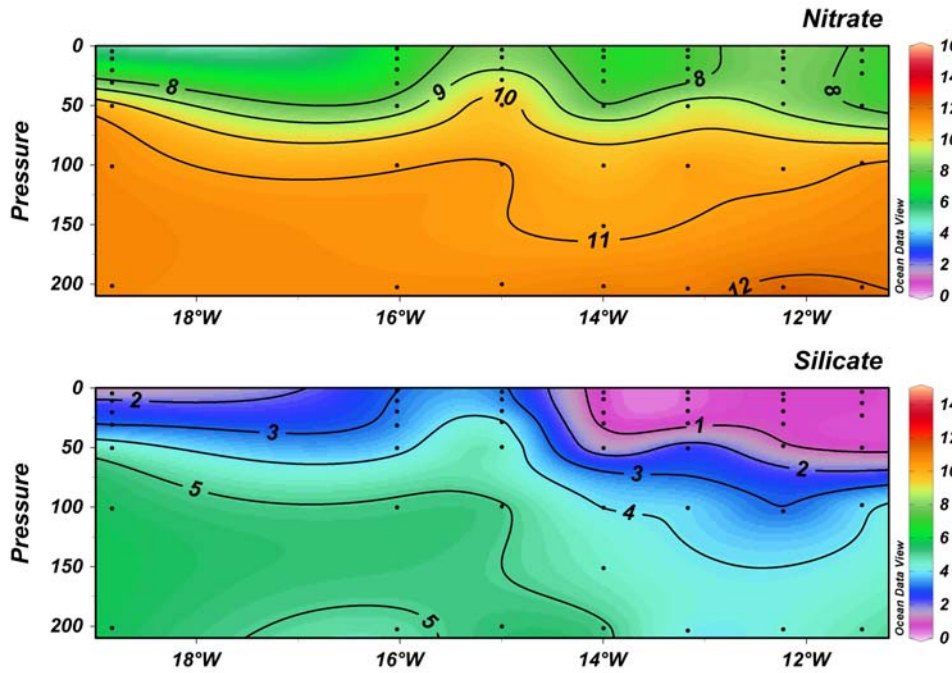
3. Mynd Vensl næringarefna í Íslandshafi að vetrarlagi 2006 og 2007 a) nítrat sem fall af fosfati, b) nítrat sem fall af kísli og c) nítrat sem fall af seltu.

Figure 3. Nutrients relations in the Iceland Sea in winter time 2006-2007 a) nitrate vs. phosphate, b) nitrate vs. silicate and c) nitrate vs. salinity.

Þessara næringarefna þegar lífrænt efni brotnar niður. Kísill berst í upplausn á meira dýpi en nítrat enda er hann bundin í stoðgrind kísilþörungna en ekki lífrænan vef þeirra. Þá vex kísilstyrkur allt til botns en mjög litlar breytingar verða á nítratsstyrk fyrir neðan 500 m dýpi. Áhrif blöndunar við pólsjó með tilheyrandi seltulækkun sést á sambandi næringarefna við seltu (3. mynd c). Styrkur þeirra lækkar þegar seltan lækkar. Í báðum vetrarleiðöngrunum sem farnir voru norður á 69° skar ein stöð (á 16°V) sig úr hvað varðar dreifingu á styrk næringarefna í efstu u.þ.b. 200 m vatnssúlunnar. Hún er yfir Kolbeinseyjarhrygg, þar mældist næringarefnastyrkur lægri en annars staðar á sniðinu, sú lækkun var þó ekki í tengslum við lága seltu (1. mynd og 3. mynd c).

Vor

Leiðangrar voru farnir til athugana snemma vors, 18.–25. maí 2006, 12.–18. apríl 2007 og 1.–5. maí 2008. Á 4. mynd er sýndur styrkur nítrats og kísils á sniði á 69°N seint í maí 2006. Styrkur næringarefna hafði lækkað talsvert vegna upptöku plöntusvifs. Styrkur nítrats og fosfats var einsleitur í efstu 50 metrunum á nánast öllu sniðinu en styrkur kísils var hins vegar mun lægri austan megin á sniðinu heldur en vestan megin hryggjar. Nítrat og fosfat voru ekki uppurin í yfirborðslögum, nítratstyrkur nærri yfirborði var á bilinu 7–8,5 µM og fosfatstyrkur á bilinu 0,5–0,65 µM. Mikið hafði verið notað af kísli þar sem styrkurinn var á bilinu 0,5–5 µM. Frá 19.- 24. apríl 2007 var sýnum safnað til athugana á vorástandi í Íslandshafi. Þetta var mánuði fyrr en vorið 2006. Athuganir voru gerðar á sniði á 69°N (5. mynd) og á sniði frá Langanesi til Jan Mayen (6. mynd). Gögnin frá sniðinu á 69°N sýna að styrkur næringarefna í yfirborðslögum var nú hærri en mældist á sömu stöðvum í febrúar sem bendir til að lóðrétt blöndun hafi haldið áfram í mars og jafnvel í apríl. Vestan megin á sniðinu var næringarefnastyrkurinn hærri heldur en austan megin og er það einkum áberandi fyrir kísil þar sem munurinn er allt að 2 µM. Á nítratstyrk má ráða að einhver upptaka hafði þegar átt sér stað þegar mælingin var gerð en lagskipting var veik og nítratstyrkur um 10 µM allt niður á 200 m austan megin á sniðinu. Vestan megin var meiri breytileiki í nítratstyrk með dýpi. Á Langanes - Jan Mayen sniðinu sést dreifing næringarefna í djúplögum

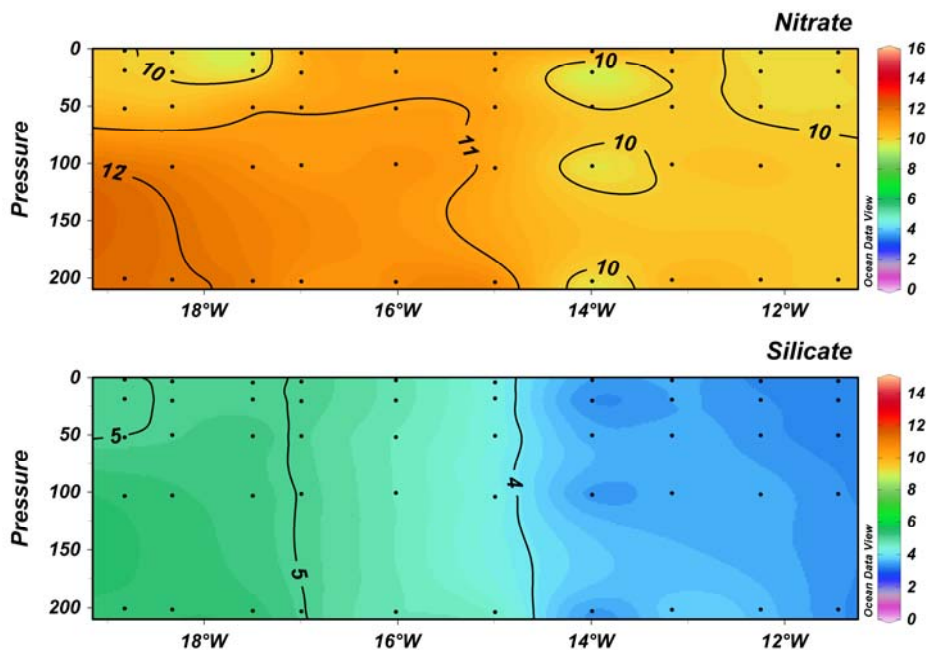


4. mynd. Dreifing nitrats og kísils (μM) á lóðréttu sniði frá yfirborði og niður á 200 m á 69°N 19. – 24. maí 2006. Vestasta stöðin er á $18^\circ50'$ V og sú austasta á $11^\circ27'$ V.

Figure 4. Nitrate and silicate (in μM) on a vertical section from the surface and down to 200 m on 69°N on 19. – 24. May 2006. The westernmost station is at $18^\circ50'$ W and the easternmost is at $11^\circ27'$ W.

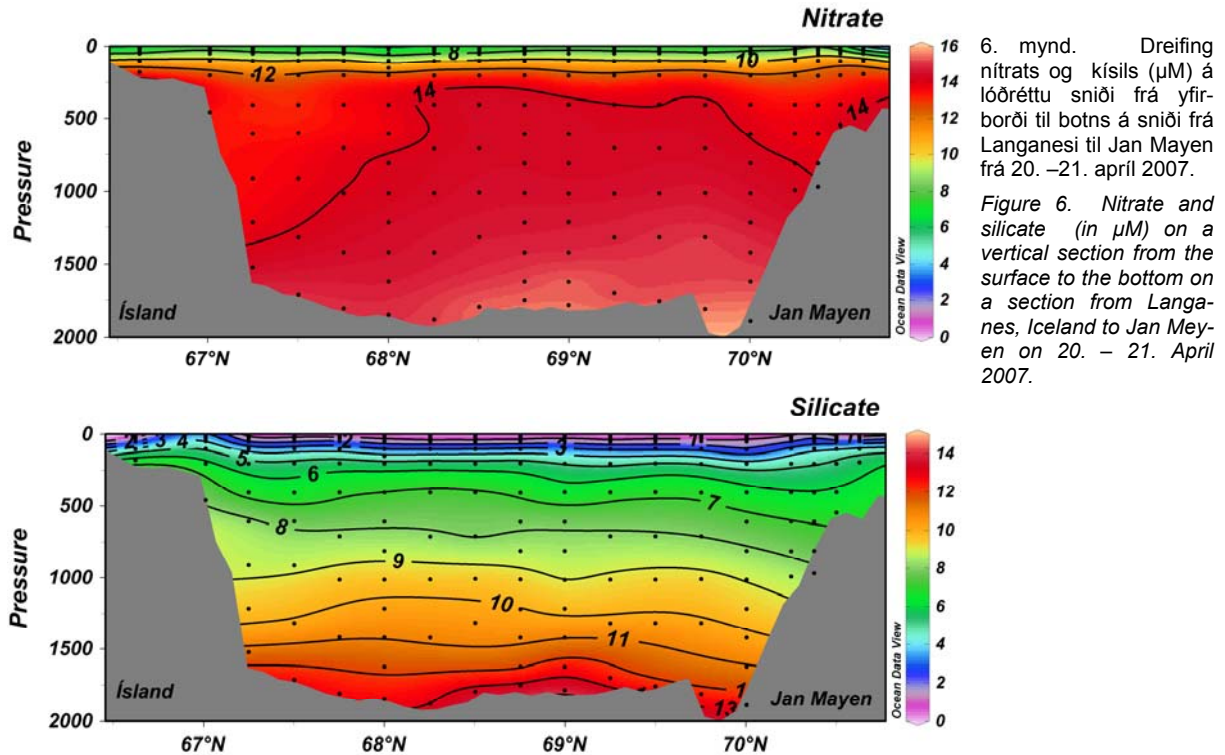
sjávarins, níturat hefur náð sínum hámarksstyrk, $14 \mu\text{M}$ á um 1500 m dýpi syðst, á um 250 m dýpi í hafinu mitt á milli Íslands og Jan Mayen og á um 1000 m dýpi við Jan Mayen. Kísilstyrkur í djúplögum dreifist á annan hátt (6. mynd b) þar sem styrkurinn eykst sífellt í áttina að botni og er hæstur $13\text{--}14 \mu\text{M}$ og dýpið niður á ákveðna jafngildisfleti vex þegar norðar dregur. Vorástand var einnig rannsakað snemma í maí árið 2008 eða frá 1.–5. maí. Mælt var á austur-vestur sniðum bæði á 69°N og á 68°N . Níturat og kísilstyrkur á þessum sniðum frá yfirborði og niður á 200 m dýpi er sýndur á 7. mynd. Lítill munur á sniðunum á 69°N og 68°

N en í austur hlutanum hafði orðið einhver upp-taka næringarefna í yfirborðslagi sem náði all-djúpt niður í vatnssúluna. Glögglega kemur fram hve lágur kísilstyrkurinn er ($<4 \mu\text{M}$) austan megin á þessum sniðum. Níturatstyrkur hafði lækkað lítillega í yfirborðslaginu vegna upptöku plöntusvifs. Sú lækking náði djúpt í blönduðu yfirborðslagi (100–150 m). Á 8. mynd eru sýnd vensl næringarefnastyrks í efstu 200 metrunum. Fosfat, kísill og níturat voru tekin upp af plöntusvifi á svipaðan hátt austan megin í Íslandhafi þar sem styrklækkun þeirra að vori var nánast línuleg (8. mynd a og b). Vestast á sniðinu á 69°N , árið 2006, var á hinn bóginn



5. mynd. Dreifing nitrats og kísils (μM) á lóðréttu sniði frá yfirborði og niður á 200 m á 69°N þann 20. – 23. apríl 2007. Vestasta stöðin er á $18^\circ50'$ V og sú austasta á $11^\circ27'$ V.

Figure 5. Nitrate and silicate (in μM) on a vertical section from the surface and down to 200 m on 69°N on 20. – 23. April 2007. The westernmost station is at $18^\circ50'$ W and the easternmost is at $11^\circ27'$ W.

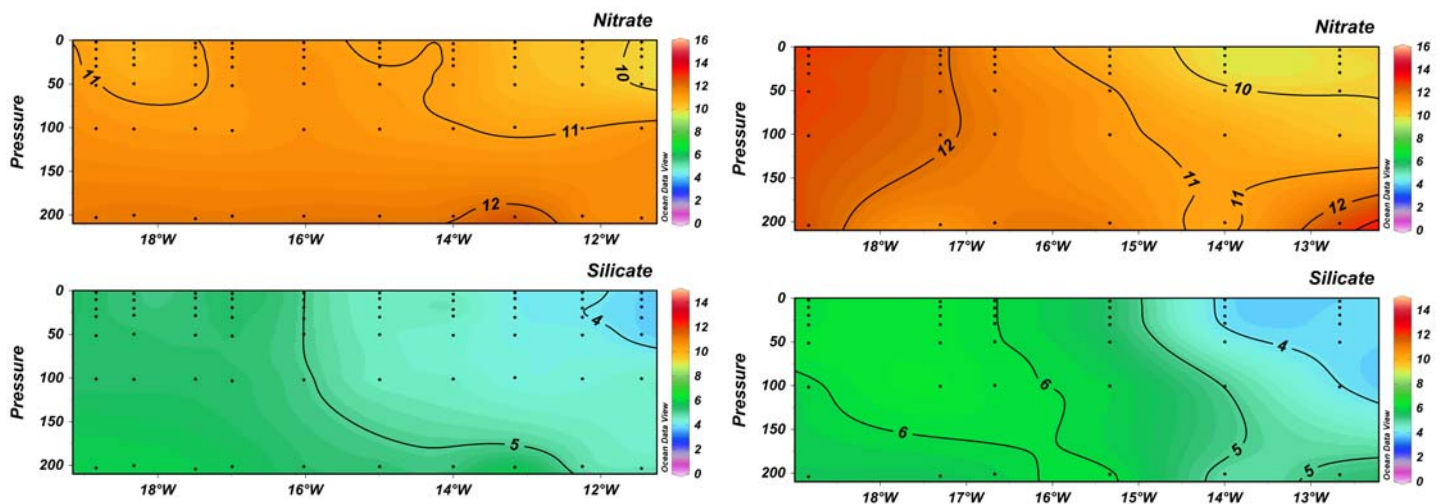


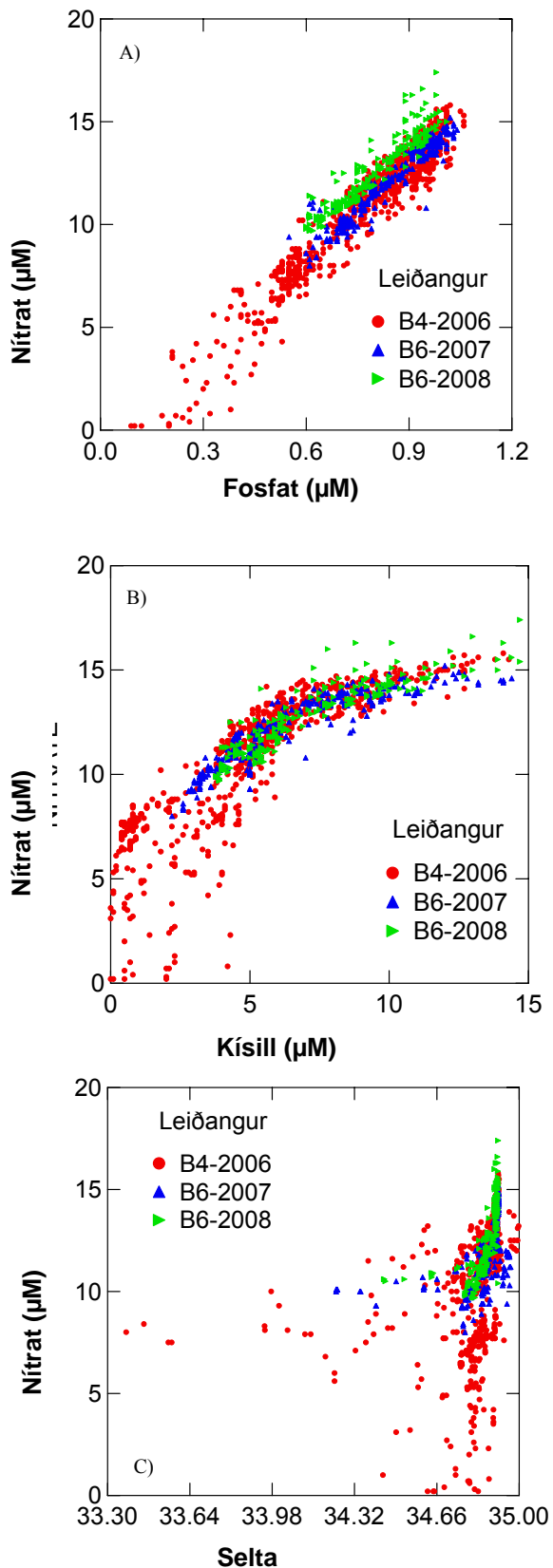
annars konar samband milli upptöku kísil og nitrats þar sem hlutfallslega minni upptaka hafði orðið á kísli heldur en nitrati. Línuleg tengsl styrks kísils og nitrats vestan megin á sniðinu eru $\text{NO}_3 = 1,7 * \text{Si}(\text{OH})_4 + 1,97$ ($n=61, r^2=0,83$) en austan megin $\text{NO}_3 = 1,1 * \text{Si}(\text{OH})_4 + 6,9$ ($n=73, r^2=0,97$). Austan megin, þar sem hallatalan er 1,1 má gera ráð fyrir að kísilþörungar hafi verið mikilvægur hluti vorblómans. Hærri

hallatala lýsir hlutfallslega meiri upptöku kísils miðað við nitrát en sigmoid upptökumynstur var á $\text{Si}(\text{OH})_4 - \text{NO}_3$ (8. mynd b) þar sem kísill var hár í samanburði við það sem var austar á sniðinu.

Sumar

Farnir voru 3 leiðangrar að sumarlagi, 10. júlí–3. ágúst 2006, 8.–28. ágúst 2007 og 6. ágúst til 3. september 2008. Í júlí 2006 (9. mynd)





8. mynd. Vensl næringarefna í efstu 200 metrunum í Íslandshafi að vorlagi 2006-2008 a) nítrat sem fall af fosfati, b) nítrat sem fall af kísli og c) nítrat sem fall af seltu.

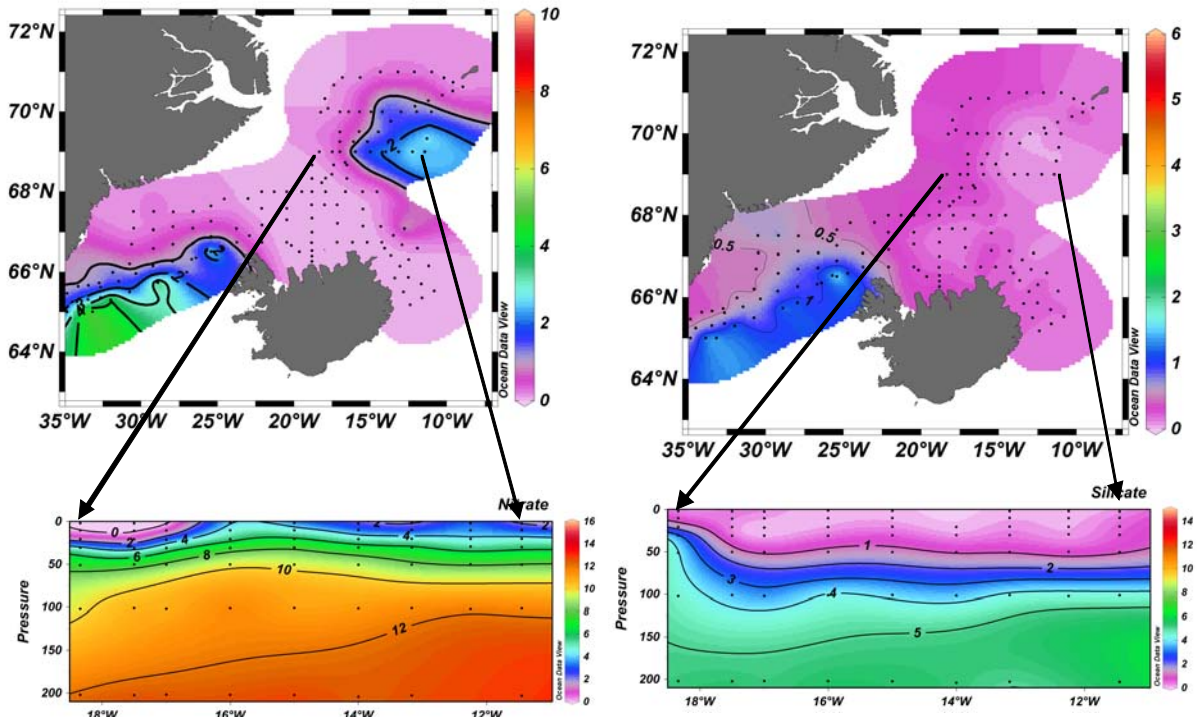
Figure 8. Nutrients relations in the top 200 meters in the Iceland Sea in spring 2006-2008 a) nitrate vs. phosphate, b) nitrate vs. silicate and c) nitrate vs. salinity.

voru nítrat og kísill uppurin í yfirborðslaginu á nærri öllum athugunarstöðvum. Leif var eftir af fosfati. Styrkur nitrats var lægri en $0,5 \mu\text{M}$, kísils minni en $0,5 \mu\text{M}$ og fosfats minni en $0,2 \mu\text{M}$. Vestanvert á rannsóknasvæðinu var selta sjávarins í yfirborðinu lægri vegna pólsjárvar. Skýr undantekning frá þessari dreifingu næringarefnastyrks í yfirborði var í miðju Íslandshafi, austan Kolbeinseyjarhryggjarins. Þar var til staðar nægt nítrat í yfirborðinu, um $4 \mu\text{M}$ að meðaltali í efstu 50 metrunum. Á 9. mynd sést einnig dýptarsnið á sniði á 69°N þar sem greinilega kemur fram munur á dreifingu nitrats og kísils þar sem kísill er nánast horfinn allt niður á 50 m dýpi austan megin en á 20 m dýpi vestan megin er þó nokkurn kísil að finna. Dýptardreifing nitrats er einnig frábrugðin austan og vestan megin á sniðinu þar sem nítrat er nær horfið úr efstu 20-30 metrunum vestan megin en gnótt er af því austan megin eins og fyrr segir. Í ágúst 2007 (10. mynd) fengust svipaðar niðurstöður þó að mismunurinn á kísilstyrk milli vesturs og austurs hafi verið enn meira afgerandi en 2006. Í ágúst 2008 (11. mynd) fengust aðrar niðurstöður varðandi nítrat þar sem nítrat var með öllu uppuríð við yfirborð og niður á 20–30 m dýpi um allt Íslandshaf. Sem fyrr var þó munur milli vesturs og austur á styrk kísils.

Styrkur ólífrænna næringarefna, nitrats, kísils og fosfats, í efstu 100 metrunum að sumarlagi er sýndur í töflu 2. Þar koma fram meðaltöl af styrknum (í μM) flokkuð eftir seltu þar sem öllum gildum er skipt í Pólsjó með seltu lægri en $34,4$ og arktískan yfirborðssjó með seltu hærri en $34,4$. Styrkur næringarefnanna nálgadist greiningarmörk í sumum tilfellum. Einungis í þessum leiðöngrum var mælt á nægjanlegum fjölda stöðva til að greina tölf-ræðilegan mun í dreifingu næringarefna milli sjógerða.

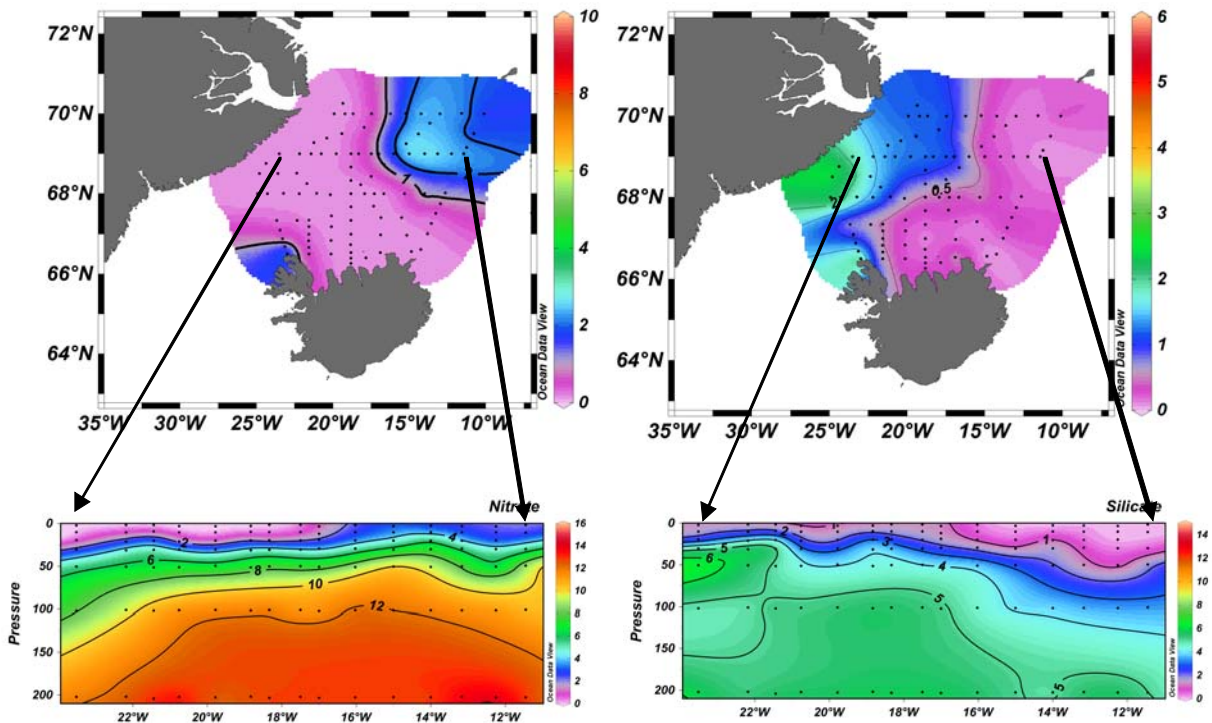
Í efstu 20 metrunum var marktækur munur á styrk allra næringarefnanna milli þessara sjógerða öll árin. Nítrat og fosfat voru lægri í Pólsjónum árin 2006 og 2007, munurinn $1,5$ og $2,1 \mu\text{M}$ fyrir nítrat og $0,04$ og $0,07 \mu\text{M}$ fyrir fosfat, en hærri styrkur nitrats og fosfats fannst í seltu-lægri sjónum árið 2008. Munurinn er þó lítill eða $0,5 \mu\text{M}$ fyrir nítrat og $0,13 \mu\text{M}$ fyrir fosfat. Styrkur kísils var alltaf hærri í Pólsjónum, munurinn var á bilinu $0,3$ – $0,7 \mu\text{M}$

Á 30 metra dýpi var einungis munur á nítrat styrk árið 2007 þegar hann var lægri í Pólsjó,



9. mynd. Dreifing nitrats (til vinstri) og kísils (hægri) (μM) við yfirborði í Íslandshafi frá 10. júlí - 3. ágúst 2006. Einnig er sýndur styrkurinn og á lóðréttu sniði frá yfirborði og niður á 200 m á 69°N þann 26.- 27. júlí 2006.

Figure 9. Distribution of nitrate (left) and silicate (right) (in μM) at the surface in the Iceland Sea from 10. July – 3. August 2006. Also shown is their concentrations on a vertical section from the surface and down to 200 m on 69°N on 26. - 27. July 2008.



10. mynd. Dreifing nitrats (til vinstri) og kísils (hægri) (μM) við yfirborði í Íslandshafi frá 8. - 28. ágúst 2007. Einnig er sýndur styrkurinn og á lóðréttu sniði frá yfirborði og niður á 200 m á 69°N þann 19.- 21. ágúst 2007.

Figure 10. Distribution of nitrate (left) and silicate (right) (in μM) at the surface in the Iceland Sea from 8. - 28. August 2007. Also shown is their concentrations on a vertical section from the surface and down to 200 m on 69°N on 19. - 21. August 2007.

Tafla 2. Styrkur næringarefna í efstu 100 metrunum í þremur sumarleiðöngnum í júlí og ágúst 2006 – 2008, B6-2006 frá 10. júlí – 3. ágúst 2006, B11-2007 frá 8. – 28. ágúst 2007 og A11-2008 frá 6. ágúst – 3. september 2008. Taflan sýnir meðaltal af styrknum (μM), staðalfrávik (\pm std) og fjölda mælinga (n). Gildin frá 0, 10 og 20 metrum eru tekin saman (0 – 20). Mæligildi eru flokkuð eftir seltu og skipt í Pólsjó með seltu lægri en 34,4 og arktískan yfirborðssjó með seltu hærri en 34,4 (Swift og Aagaard, 1981). Mæligildum úr Atlantssjó með seltu hærri en 35 er sleppt.

Table 2. Nutrient concentration in the top 100 meters in three summer cruises in July and August 2006–2008, B6-2006 from 10. July – 3. August 2006, B11-2007 from 8. – 28. August 2007 and A11-2008 from 6. August – 3. September 2008. The table shows the average concentration (μM), the standard deviation (\pm std) and the number of measurements (n). The values from 0, 10 and 20 meters are averaged (0-20). The measured values are categorized by salinity to Polar water with salinity lower than 34,4 and Arctic surface water with salinity higher than 34,4 (Swift and Aagaard, 1981). All values from Atlantic surface waters ($S>35$) are excluded.

		Nítrat (μM)		Kísill (μM)		Fosfat (μM)	
		Pólsjór	Arctic	Pólsjór	Arctic	Pólsjór	Arctic
B6-2006	0 - 20	0.18 \pm 0.49 (66)	1.66 \pm 1.61 (108)	0.46 \pm 0.37 (66)	0.17 \pm 0.20 (108)	0.13 \pm 0.06 (66)	0.17 \pm 0.11 (108)
B11-2007	0 - 20	0.37 \pm 0.81 (91)	2.51 \pm 1.79 (183)	1.12 \pm 1.13 (191)	0.66 \pm 0.83 (185)	0.16 \pm 0.13 (191)	0.23 \pm 0.11 (185)
A11-2008	0 - 20	1.10 \pm 1.44 (218)	0.60 \pm 0.94 (459)	1.19 \pm 0.97 (218)	0.47 \pm 0.51 (459)	0.24 \pm 0.12 (218)	0.11 \pm 0.08 (459)
B6-2006	30	3.17 \pm 1.97 (11)	4.49 \pm 2.21 (46)	1.85 \pm 1.05 (11)	0.63 \pm 0.77 (46)	0.36 \pm 0.15 (11)	0.42 \pm 0.14 (46)
B11-2007	30	2.63 \pm 1.63 (41)	4.25 \pm 2.25 (86)	3.27 \pm 1.89 (41)	1.28 \pm 1.09 (86)	0.39 \pm 0.17 (41)	0.36 \pm 0.15 (86)
A11-2008	30	3.80 \pm 2.34 (66)	3.63 \pm 2.04 (174)	2.70 \pm 1.70 (66)	1.31 \pm 0.94 (174)	0.41 \pm 0.14 (66)	0.34 \pm 0.14 (174)
B6-2006	50	6.50 \pm 1.34 (4)	7.41 \pm 1.99 (54)	3.53 \pm 0.67 (4)	1.86 \pm 1.22 (54)	0.57 \pm 0.06 (4)	0.63 \pm 0.11 (54)
B11-2007	50	5.76 \pm 1.48 (191)	8.65 \pm 2.38 (183)	4.83 \pm 0.95 (191)	3.03 \pm 1.36 (185)	0.59 \pm 0.05 (191)	0.62 \pm 0.12 (185)
A11-2008	50	5.75 \pm 2.77 (51)	8.94 \pm 2.07 (218)	3.76 \pm 1.79 (51)	3.44 \pm 1.26 (218)	0.52 \pm 0.13 (51)	0.66 \pm 0.09 (218)
B6-2006	100	6.21 (1)	11.25 \pm 0.92 (55)	3.91 (1)	4.36 \pm 0.76 (55)	0.56 (1)	0.77 \pm 0.03 (55)
B11-2007	100	7.97 \pm 1.66 (66)	11.83 \pm 1.24 (108)	5.05 \pm 0.37 (66)	4.88 \pm 1.02 (108)	0.65 \pm 0.04 (66)	0.77 \pm 0.07 (108)
A11-2008	100	8.40 \pm 1.56 (34)	12.20 \pm 1.23 (255)	5.09 \pm 0.66 (34)	5.19 \pm 0.79 (255)	0.63 \pm 0.07 (34)	0.79 \pm 0.06 (255)

ekki er marktækur munur á styrk fosfats á 30 metra dýpi. Það mældist marktækur munur á kísilstyrk á 30 m þar sem styrkurinn var alltaf hærri í Pólsjónum, munurinn var á bilinu 1,2–2 μM .

Á 50 m dýpi var ekki marktækur munur á styrk nítrats og fosfats árið 2006 en þá eru fáar stöðvar með Pólsjó á þessu dýpi. Árin 2007 og 2008 var hins vegar marktækur munur á styrk nítrats og fosfats þessara sjógerða þar sem styrkurinn var lægri í Pólsjónum, munurinn var rúmlega 3 μM fyrir nítrat og 0,03–0,14 μM fyrir fosfat. Marktækur munur var á styrk kísils á 50 m dýpi árin 2006 og 2007 þar sem styrkurinn var um 2 μM hærri í Pólsjónum, árið 2008 var ekki marktækur munur á styrk kísils í Pólsjónum og arktíska sjónum. Árið 2006 voru engin sýni af Pólsjó á 100 m dýpi en árin 2007 og 2008 var marktækur munur á styrk nítrats og fosfats á 100 m dýpi milli sjógerðanna. Munurinn var tæplega 4 μM fyrir nítrat og

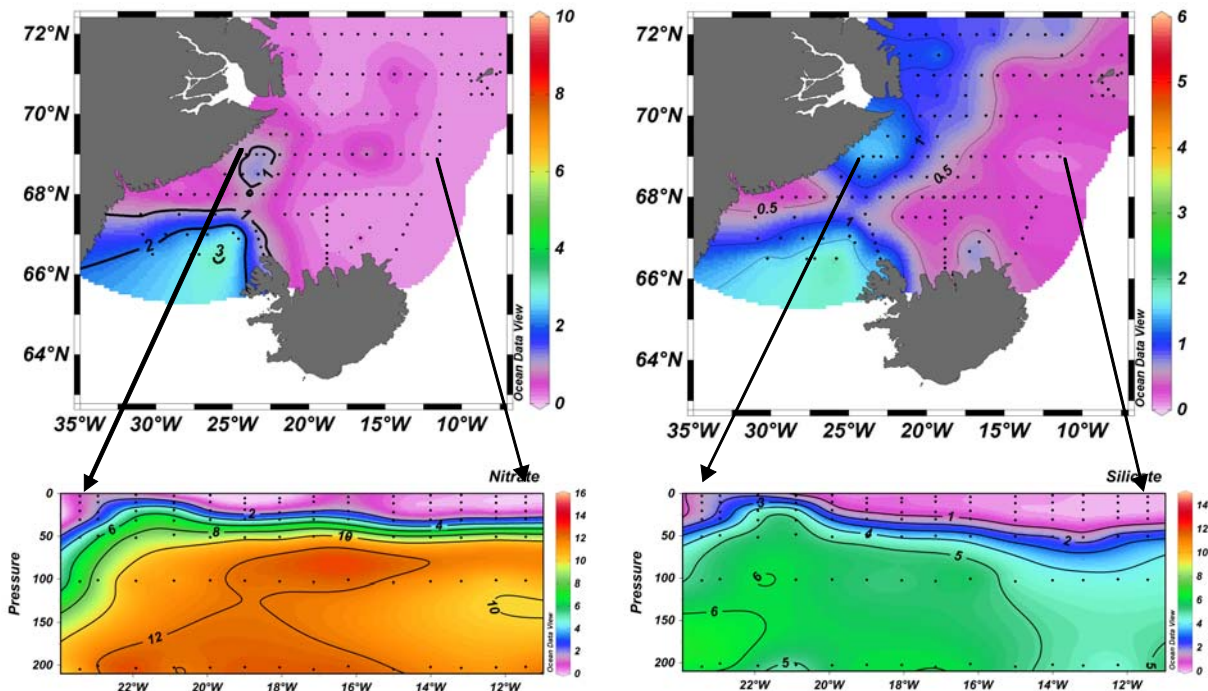
0,12–0,16 μM fyrir fosfat. Ekki var marktækur munur á styrk kísils.

Á 12. mynd eru sýnd vensl næringarefna í efstu 50 metrunum. Línuleg tengsl (hér reiknuð fyrir gögn niður á 100 m) á milli styrks fosfats og nítrats í Pólsjónum (selta $<34,4$) eru $\text{NO}_3 = 12,9 * \text{PO}_4 - 1,6$ ($n=735$, $r^2=0,73$) en í arktískum yfirborðssjó eru þau $\text{NO}_3 = 16,3 * \text{PO}_4 - 1,4$ ($n=1874$, $r^2=0,96$). Línuleg tengsl styrks kísils og nítrats í Pólsjónum eru $\text{NO}_3 = 1,42 * \text{Si(OH)}_4 - 0,5$ ($n=749$, $r^2=0,76$) en í arktíska yfirborðssjónum eru þau $\text{NO}_3 = 1,33 * \text{Si(OH)}_4 + 3,1$ ($n=4292$, $r^2=0,80$).

Umräða

Vetur

Dreifing næringarefna hafði tengsl við hydrógrafíska eiginleika á öllum árstímum. Niðurstöðurnar sýna að febrúargildi næringarefna eru ekki endilega hámarksgildi ársins



11. mynd. Dreifing nitrats (til vinstri) og kísils (hægri) (μM) við yfirborð í Íslandshafi frá 6. ágúst - 3. september 2008. Einnig er sýndur styrkurinn og á lóðréttu sniði frá yfirborði og niður á 200 m á 69°N þann 15.- 26. ágúst 2008.

Figure 11. Distribution of nitrate (left) and silicate (right) (in μM) at the surface in the Iceland Sea from 6. August – 3. September 2008. Also shown is their concentrations on a vertical section from the surface and down to 200 m on 69°N on 15. August - 3. September 2008.

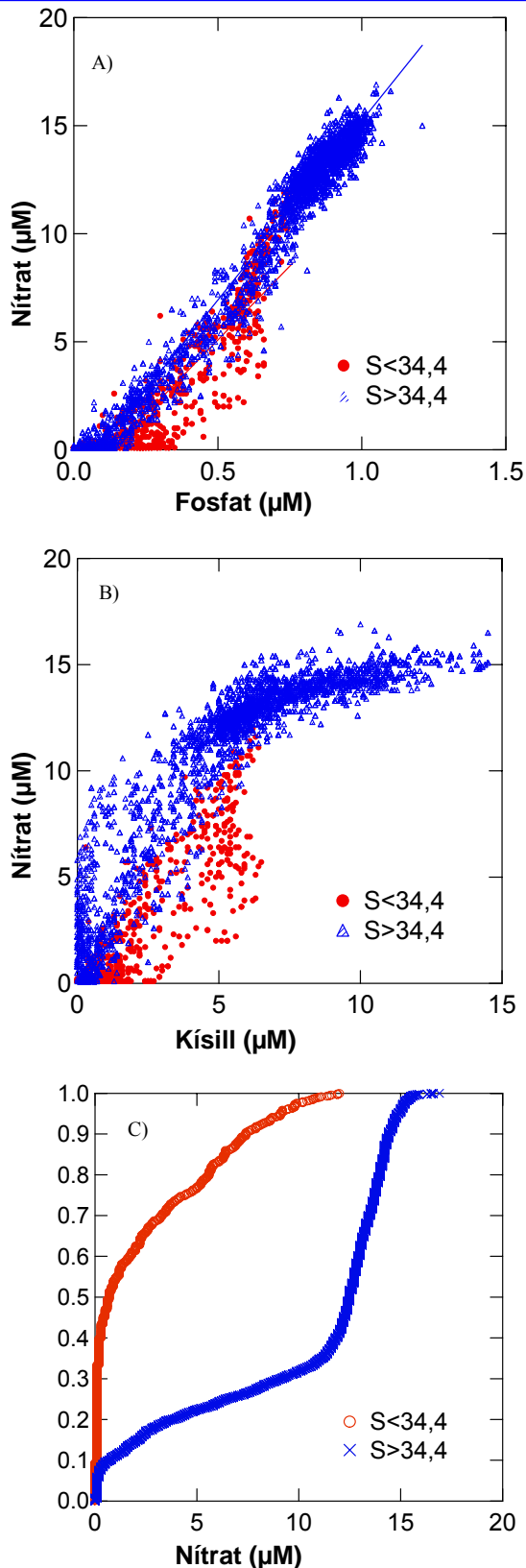
heldur getur lóðrétt blöndun náð dýpra síðar og jafnvel fram í apríl. Dýpra var á jafngildislinum vestanvert á 69°N sniðinu sem og á miðju Langanes- Jan Mayen sniðinu. Það er rangsælis hringstreymið í Íslandshafi miðju sem veldur þessari styrkdreifingu. Athyglisvert er hve lágur árlegur hámarksstyrkur kísils er, eða 4–5 μM í lok vetrar því hann setur takmörk á heildarframleiðni kísilþörungum á ársgrundvelli. Ólíkt köfnunarefni og fosfór sem eru í sjó á mörgum lífrænum og ólífrænum formum kemur uppleystur kísill nær eingöngu fyrir sem $\text{Si}(\text{OH})_4$, orthosilicic sýra (Brzezinski & Nelson 1989). Kísillinn berst ekki upp fæðukeðjur sem nokkrum nemur (Dugdale o.fl. 1995) og endurnýjun hans á sér ekki stað með niðurbroti lífrænna leifa heldur með uppleysingu ópals en á því formi er kísill í stoðgrind kísilþörungum (Broecker & Peng 1982). Endurnýjun á sér því stað á meira dýpi en endurnýjun nitrats og fosfats. Því verður endurnýjun kísilsins í yfirborðslögum ekki meiri en raun ber vitni þar sem vetrarblöndun nær að jafnaði einungis niður á 100-200 metra dýpi (Jón Ólafsson 2003). Í samanburði við djúpsjó í Grænlandshafi er grynna niður á háan kísilstyrk í Íslandshafi sem er meiri en 12 μM fyrir neðan 1500 m dýpi (1. og 6. mynd). Það er

hærri kísilstyrkur í Íslandshafi en alls staðar í Grænlandshafi, hann er svipaður og finnst á um 3000 m dýpi í Noregshafi. Talið er að þetta megi rekja til minni djúpblöndunar að vetrarlagi í Íslandshafi og lýsi löngum viðstöðutíma (Blindheim og Rey, 2004).

Vor

Vorið 2006 hafði kísilstyrkur lækkað verulega austan megin á rannsóknasvæðinu og var styrkurinn þá orðinn það lágur að hann takmarkaði áframhaldandi vöxt kísilþörungum (Egge & Asknes 1992). Vestan megin í Íslandshafi var kísilupptaka með öðrum hætti þetta vor þar sem kísill hafði lítið verið nýttur og var marktækur munur á sambandi kísils og nitrats austan og vestan megin við Kolbeinseyjarhrygginn. Þetta bendir til þess að mismunandi tegundir svifþörungum hafi vaxið um vorið á svæðinu, að kísilþörungum hafi verið ráðandi í svifinu austan megin. Þetta sést á mikilli lækkun í kísilstyrk en vestan megin var hlutfallslega minni upptaka kísils (8. mynd). Austan megin á sniðinu voru vísbendingar um dýpri blöndun yfirborðslagsins þar sem lækkun í styrk næringarefna náði niður fyrir 50 metra dýpi.

Á sniði sem tekið var þvert yfir Íslandshaf frá Langanesi til Jan Mayen (6. mynd) kemur



12. mynd Vensl næringarefna í efstu 50 metrunum í Íslandshafi að sumarlagi 2006-2008 flokkað eftir a) nítrat sem fall af fosfati, b) nítrat sem fall af kísili og c) quantile fall nitrats.

Figure 12. Nutrients relations in the top 50 meters in the Iceland Sea in summer 2006-2008 categorized by salinity a) nitrate vs. phosphate, b) nitrate vs. silicate and c) quantile plot of nitrate.

glögglega í ljós hvernig hringstreymið hefur áhrif á lóðrétt dreifingu næringarefna, sömu eiginleikar eru einnig í dreifingu kolefnis og súrefnis. Mun grynna er á 14 µM jafngildislinu nitrats á miðju sniðinu heldur en syðst eða nyrst. Sama má greina fyrir kísilstyrk en hann fer vaxandi allt til botns. Niðurstöðurnar sýna um 2 µM hærri kísilstyrk niður við botn miðað við athuganir frá árinu 1982 á sama sniði en nítrat og fosfat eru í góðu samræmi við fyrri niðurstöður (Unnsteinn Stefánsson & Jón Ólafsson 1991).

Sá munur sem mældist á kísilstyrk á 69°N sniðinu í apríl 2007 endurspeglar útbreiðslu sjógerða og hefur þessi munur skipt miklu máli fyrir heildarframleiðslu kísilþörungna á svæðinu. Kísilþörungar eru taldir mikilvægir til að flytja kolefni út úr yfirborðslögum sjávar og benda þessar niðurstöður því til þess að meiri flutningur verði á kolefni úr yfirborðinu og til dýpri laga sjávarins vestan megin í Íslandshafi þar sem hámarksstyrkur kísilsins er minni austan megin og lóðrétt blöndun er lítil. Austan megin á sniðunum á 68°N og 69°N (7. mynd) sást árið 2008 að lækkun hafði orðið á næringarefnastyrk allt niður á 100 m dýpi sem sýnir að lóðrétt blöndun hafi enn verið talsverð eftir að þörungavöxtur hófst. Annars var ekki mikill munur á næringarefnaástandi á þessum tveim sniðum.

Sumar

Eitt af markmiðum þessarar rannsóknar var að athuga hvernig muninum á næringarefnabúskap mismunandi sjógerða væri háttað og hvaða afleiðingar það kynni að hafa á frumframleiðni milli svæða. Á nærri öllum dýpum frá yfirborði og niður á 100 m fannst tölfræðilegur munur á styrk næringarefna milli Pólsjávar og arktíks yfirborðssjávar að sumarlagi. Munurinn var meiri á milli svæða (sjógerða) heldur en hann var á milli ára. Nærri Grænlandi voru allmargar stöðvar teknar þar sem yfirborðslög einkendust af mjög seltulágum Pólsjó. Í honum er nítrat:fosfat sambandið allfrábrugðið því sem gerist annars staðar og sjást þess skýr merki í gögnunum. Þetta kemur fram sem sérstaklega lágur nítratstyrkur miðað við fosfatstyrk. Almennt eru þó niðurstöður ársferla næringarefna í samræmi við það sem lýst hefur verið í Grænlandshafi (Rey o.fl. 2000). Vestan megin á rannsóknasvæðinu var nítrat algjörlega horfið í yfirborðslögum sjávarins að sumarlagi. Lagskipting var sterk og kom í veg fyrir upp-

blöndun næringarefna. Kísill var til staðar sem og fosfatleif en nítrat var örugglega takmarkandi næringarefni á þessum slóðum.

Árin 2006 og 2007 var til staðar umtalsvert nítrat á afmörkuðu svæði í miðju straumhvirlsins í Íslandshafi, þar var um 30-40% af vetrarforðanum ónýttur eða að endurnýjun nitrats og fosfats úr lífrænum leifum í yfirborðinu hafi verið hröð. Árið 2008 voru niðurstöðurnar frábrugðnar þessu, þegar nítrat kláraðist alveg við yfirborð. Tvær megin-skýringar geta verið á því að nítrat klárast ekki til fullnustu í yfirborðslögum sumrin 2006 og 2007. Önnur er að fjöldi kísilþörungna sé takmarkaður af litlum kísilstyrk og mjög hraðri upptöku hans að vori (Dale o.fl. 1999) og að aðrir hópar svifþörungna nái ekki að nýta allt nítratið. Hin er sú að sökum mikils magn dýrasvifs sé beitarafán á plöntusvifinu svo mikið að það haldi fjölda svifþörungna niðri (Taylor o.fl. 1993, Peinert o.fl. 1989). Svipuðum niðurstöðum hefur verið lýst í Noregshafi (Dale o.fl. 1999) þar sem styrkur nitrats nær í sumum árum aldrei þeim mörkum að teljast takmarkandi fyrir frekari vöxt svifþörungna en algengara er þó að nítrat nýtist þar til fullnustu.

Þetta mynstur með hátt nítrat og fosfat en mjög lágan kísil er svipað og lýst hefur verið fyrir HNLC (high nutrients low chlorophyll) svæði, einkum í Kyrrahafi (Martin & Fitzwater 1988, Boyd 2004). Í Íslandahafi er þó styrkur næringarefnanna annar. Á HNLC svæðum er talið að skortur á járn hamlar frumframleiðni (Boyd 2004). Engar heimildir finnast fyrir því að járnskortur sé svona norðarlega í Atlantshafi, enda fátt um mælingar, en bent hefur verið á að sunnan Íslands geti járnskortur hamlað vexti svifþörungna síðsumars (Nielsdottir o.fl. 2009). Tilgátur eru um að járn geti stundum orðið takmarkandi í Noregshafi (Findley o.fl. 2009).

Síritagögn (Þórarinn S. Arnarsson o.fl. 2007) sýna einnig minni notkun á koldíoxíði á þessu svæði sem bendir til að minni frumframleiðni hafi orðið þar. Vestan megin á rannsóknasvæðinu höfðu öll næringarefni verið notuð í efstu lögum sjávarins í júlí. Niðurstöður úr síritandi mælingum á koldíoxíði og súrefni sýna að súrefnismagn jókst í yfirborðslögum milli maí og júlí og Íslandshaf var alltaf undirmettað af koldíoxíði m.t.t. andrúmsloftsins. Athyglisvert er að undirmettum koldíoxíðs var minni í miðju Íslandshafi í júlí, inni í hringstreyminu, heldur en utan þess og fer það saman við hinn

háa nítratstyrk á svæðinu. Þetta bendir þess að frumframleiðni í miðjum Íslandshafshringhvirlinum sé minni heldur en yfir Kolbeinseyjarhryggnum og á jöðrum straumhvirlsins.

Samantekt

Nú liggja fyrir mikil gögn um ársferla og áramun á styrk næringarefna í Íslandshafi. Meginniðurstöður eru að mikill munur er á næringarefnabúskap austan og vestan megin við Kolbeinseyjarhrygg. Vestan megin er að jafnaði lægri styrkur nitrats en austan megin og í Íslandshafi er viðvarandi kísilskortur í yfirborðslögum að sumri. Nítrat og fosfat nýttust ekki til fullnustu í yfirborðslögum austan megin við Kolbeinseyjarhrygg árin 2006 og 2007 en nítrat kláraðist árið 2008. Frekari úrvinnsla á þessum gögnum mun beinast að tengslum næringarefna við sjógerðir og að mati á frjósemi svæða vestan- og austan megin í Íslandshafi.

Þakki

Ég þakka öllu samstarfsfólki í verkefnisstjórninni fyrir samvinnuna í þessu verkefni, Ólafur K. Pálsson á sérstakar þakki skildar fyrir verkefnisstjórnina. Þá vil ég sérstalega þakka Magnúsi Danielsen, Alice Benoit-Catten, Þóramni S. Arnarsyni, Jóni Ingvari Jónssyni, Kristínu Valdsóttur og Jóni Ólafssyni fyrir aðstoð við þetta verkefni til sjós og lands. Jón Ólafsson las yfir þetta handrit og færði fjölmargt til betri vegar. Að lokum þakka áhöfnum rannsóknaskipanna Bjarna Sæmundssonar og Árna Friðrikssonar fyrir veitta aðstoð.

Heimildir

- Aminot, A. & Kérouel, R. 1998. Pasteurization as an alternative method for preservation of nitrate and nitrite in sea water samples. *Marine Chemistry* 61: 203-208.
- Bathmann U. V., Peinert R. & Noji TT., o.fl. 1990. Pelagic Origin and Fate Of Sedimenting Particles In The Norwegian Sea. *Progress In Oceanography* Vol: 24,1-4, bls. 117-125.
- Boyd P. 2004. Ironing out algal issues in the southern ocean. *Science* Vol: 304, 5669, bls. 396-397.
- Brzezinski M. A. & D. M. Nelson 1989. Seasonal changes in the silicon cycle with a Gulf Stream warm-core ring. *Deep-Sea Research* 36, 1009-1030.

- Broecker W. S. & T.-H. Peng 1982. Tracers in the Sea, Eldigio Press, 690 bls.
- Blindheim, J. & Ray, F. 2004. Water-mass formation and distribution in the Nordic Seas during the 1990s. *ICES Journal of Marine Science* 61: 846-863.
- Dale, T., Ret, F. & Heimdal, B. R. 1999. Seasonal development of phytoplankton at a high latitude oceanic site. *Sarsia* 84; 5-6, 419-435.
- Dugdale, R. C. & Goering, J. J. 1967. Uptake of new and regenerated forms of nitrogen in primary productivity. *Limnology and Oceanography* 12: 196-206.
- Dugdale, R. C., Wilkerson, F. P. & Minast, H. J. 1995. The role of a silicate pump in driving new production. *Deep Sea Research* 1. Vol 42. No. 5: 697-719.
- Egge, J. K. & Asknes, D. L. 1992. Silicate as regulating nutrient in phytoplankton competition. *Marine Ecology Progress Series* 83: 281-289.
- Falkowski, P., Scholes, R. J., Boyle, E., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J., Gruber, N., Hibbard, K., Hogberg, P., Linder, S., Mackenzie, F. T., Moore, B., Pedersen, T., Rosenthal, Y., Seitzinger, S., Smetacek, V., & Steffen, W. 2000. The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system. *Science* Vol: 290, 5490: 291-296.
- Findlay, H. S., Tyrrell, T., Bellerby, R., Merico, A. & Skjelvan, I. 2008. Carbon and nutrient mixed layer dynamics in the Norwegian Sea. *Biogeosciences*, 5: 1395-1410.
- Grasshoff, K. 1970. A simultaneous multiple channel system for nutrient analysis in seawater with analog and digital data record. *Technicon Quarterly* 3: 7-17.
- Jón Ólafsson 2003. Winter mixed layer nutrients in the Irminger and Iceland Seas, 1990-2000. *ICES Marine Science Symposia* 219: 329-332.
- Jón Ólafsson, Sólveig R. Ólafsdóttir, Alice Benoit-Catten & Takahashi, T. 2010. The Irminger Sea and the Iceland Sea time series measurements of sea water carbon and nutrient chemistry 1983-2006. *Earth System Science Data* 2: 99-104.
- Longhurst, A., Sathyendranath, S., Platt, T. & Caverhill, C. 1995. An Estimate Of Global Primary Production. *Journal Of Plankton Research* 17(6): 1245-1271.
- Martin J. H. & Fitzwater, S. E. 1988. Iron-Deficiency Limits Phytoplankton Growth In The Northeast Pacific Subarctic. *Nature* Vol: 331,6154: 341-343.
- Murphy, J. & Riley, J. P. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytical Chimica Acta* 27: 31-36.
- Nielsdóttir, M. C., Moore, C. M., Sanders, R., Hinz, D., J. & Achterberg, E., P. 2009. Iron limitation of the postbloom phytoplankton communities in the Iceland Basin. *Global Biogeochemical Cycles* 23: GB3001, 13 s.
- Peinert, R., Bodungen, B. V. & Smetacek, V. 1989. Food web structure and loss rate. Í *Productivity of the Ocean: Present and Past*. Ritsj. Berger, W. H., Smetacek, V., Wefer, G. Life Science Research Report. Wiley, Berlin, bls. 35-48.
- Rey F., Noji, T. T. & Miller, L. A. 2000. Seasonal phytoplankton development and new production in the central Greenland Sea. *Sarsia*. 85(4): 329-344.
- Rey, F. 2004. Phytoplankton: the grass of the sea. Í *"The Norwegian Sea Ecosystem"*, H. R. Skjoldal (ritstj.) bls 97-136. Academic Press, Trondheim, Norway.
- Sambrotto, R. N., Mordy, C., Zeeman, S. I., Stabeno, P. J. & Macklin, S. A. 2008. Physical forcing and nutrient conditions associated with patterns of Chl a and phytoplankton productivity in the southeastern Bering Sea during summer. *Deep-Sea Research Part II-Topical Studies In Oceanography* 55(16-17): 1745-1760.
- Schlitzer, R.: Ocean Data View, <http://odv.awi.de>, 2011.
- Skogen, M. Budgell, W. P. & Rey, F. 2007. Interannual variability in Nordic Seas primary production. *ICES Journal of Marine Science* 64(5): 889-898.
- Sólveig Ólafsdóttir 2006. Styrkur næringarefna í hafinu umhverfis Ísland. *Hafrannsóknastofnunin Fjölrit nr. 122*, 24 bls.
- Swift J. H. & Aagaard, K. 1981. Seasonal Transitions And Water Mass Formation In The Iceland And Greenland Seas. *Deep-Sea Research Part A-Oceanographic Research Papers* Vol: 28,10: 1107-1129.
- Taylor, A. H. Harbour, D. S. Harris, R. P. o.fl. 1993. Seasonal succession in the pelagic ecosystem of the North-Atlantic and the utilization of nitrogen. *Journal of Plankton Research*. Vol: 15 (8): 875-891.
- Unnsteinn Stefánsson & Jón Ólafsson 1991. Nutrients and fertility of Icelandic waters. *Rit Fiskideildar* 12 (3): 1-56.

- Wells, D. E. o.fl. 1997. A review of the achievements of the EU project 'QUASIMEME' 1993–1996. *Marine Pollution Bulletin* 35(1-6): 3-17.
- Þórarinn Sv. Arnarson, Jón Ólafsson, Sólveig R. Ólafsdóttir & Magnús Danielsen 2007. Flæði koldíoxíðs milli sjávar og andrúmslofts á hafssvæðinu umhverfis Ísland. Í “Þættir úr vistfræði sjávar 2006”. *Hafrannsóknastofnunin fjölrit 103, 40 bls.*
-

Breytingar á blaðgrænumagni, frumframleiðni og tegunda-samsetningu svifþörungna í Íslandshafi.

Hafsteinn G. Guðfinnsson

Hafrannsóknastofnunin

Ágrip

*Hafsteinn G. Guðfinnsson 2012. Breytingar á blaðgrænumagni, frumframleiðni og tegunda-samsetningu svifþörungna í Íslandshafi. Haf-rannsóknir nr. 164. Gögnum um svifþörungna (blaðgræna *a*, frumframleiðni, tegundasamsetning) var safnað í 8 leiðöngrum í Íslandshafi og nálægum hafsvæðum á árunum 2006–2008. Gróðurtímabilið var hafið í apríl í Íslandshafi. Blaðgrænugildi voru lág ($<<1 \text{ mg m}^{-3}$) á þeim árstíma en gróðurinn náði djúpt enda lagskipting lítil sem engin. Vorhámark svifþörungna varð í seinni hluta maí 2006 með lagskiptingu við 50 metra dýpi. Mest blaðgræna fannst sunnarlega í Íslandshafi (68°N) og nærri Jan Mayen ($>2 \text{ mg m}^{-3}$) en minni miðsvæðis ($<2 \text{ mg m}^{-3}$). Í júlí og ágúst ríkti mjög sterk lagskipting í Íslandshafi niður á 20–30 m dýpi öll árin. Blaðgræna fannst austan við Kolbeinseyjarhrygg sumarið 2006 ($1\text{--}2 \text{ mg m}^{-3}$) samfara nokkrum næringarefnum en mun minni gróður fannst síðsumars á þessu svæði 2007 og 2008 enda næringarefni af skornum skammti. Gróður vestan við Kolbeinseyjarhrygg var mjög lítill í júlí 2006 og ágúst 2007 og 2008 enda næringarefni uppurin. Frumframleiðni svifþörungna í Íslandshafi var $<0,5 \text{ gC m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ í aðdraganda vorhámarks í sunnanverðu Íslandshafi, en $0,3\text{--}2,5 \text{ gC m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ nálægt vorhámarki í maí. Í júlí 2006 var frumframleiðni $<0,5 \text{ gC m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ vestan Kolbeinseyjarhryggs en $0,5\text{--}1,5 \text{ gC m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ austan við hrygginn. Í ágúst 2007 og 2008 var frumframleiðni mjög lág á öllu svæðinu ($<0,4 \text{ gC m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$). Kísilþörungar voru til staðar í vorgróðrinum í apríl og maí en fundust varla síðla sumars nema á skilum lagskiptingar á 20 til 30 m dýpi. Smágerðir svifþörungar voru algengir allt gróðurtímabilið frá vori til hausts og voru megin uppstaða gróðurs síðsumars. Skorupörungar voru einnig algengir allt gróðurtímabilið.*

Abstract

*Hafsteinn G. Guðfinnsson 2012. Changes in chlorophyll *a*, primary production and species composition in the Iceland Sea. Marine Research in Iceland no. 164. Data on phytoplankton (Chlorophyll *a*, primary production, species composition) were gathered in 8 cruises in the Iceland Sea and surrounding waters in the period 2006–2008. The growth season of the spring plankton had started in April in the Iceland Sea. Although Chl.*a* values were still low at that time ($<< 1$*

*mg m^{-3}) the growth reached deep in the water (50–100 m) as no stratification was found. The spring bloom of the phytoplankton occurred in late May 2006 with stratification down to 50 m depth. Highest Chl.*a* values were found in the southern part of the Iceland Sea (68°N) and near the shallow ground of Jan Mayen ($>>2 \text{ mg m}^{-3}$) but lower values were found in the central Iceland Sea ($<2 \text{ mg m}^{-3}$). In late summer (July–August) 2006–2008 strong stratification was found down to 20–30 m depth. Some chlorophyll *a* concentrations were found east of the Kolbeinsey Ridge in July 2006 ($1\text{--}2 \text{ mg m}^{-3}$) as well as some concentrations of nutrients. In late summer of 2007 and 2008 chlorophyll *a* values were much lower in this area as well as nutrient values. Low chlorophyll *a* concentrations were found west of the Kolbeinsey Ridge in late summer 2006–2008 as well as low or exhausted nutrients. Daily primary production in the Iceland Sea was $<0,5 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ in the prebloom (April–early May) but $0,3\text{--}2,5 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ under the spring bloom in late May. In July the primary production was $<0,5 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ west of the Kolbeinsey Ridge but $0,5\text{--}1,5 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ east of the Ridge. In late summer (August) 2007 and 2008 the daily primary production was low in the whole area ($<0,4 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$). Diatoms were found in the phytoplankton mainly in the spring time (April–May) but were hardly found in late summer except in deeper samples at the stratification limit (20–30 m depth). Small phytoplankton (flagellates and monads) was common through the growth season and was the main phytoplankton group in late summer. Dinoflagellates were also common during the growth season.*

Inngangur

Samantekt á frumframleiðnimælingum svifþörungna við Ísland sýnir að flestar þeirra hafa verið gerðar á íslenska landgrunninu (Kristinn Guðmundsson 1998). Samantektin sýnir að talsvert minna er til af slíkum gögnum norðan Íslands, milli 68°N og 69°N , en á norðlenska landgrunninu. Einnig er vitað að norðan við 69°N verða gögnin mun fátæklegri í tíma og rúmi og jafnvel bundin við einstaka leiðangra og árstíma. Sama gildir um önnur gögn um svifþörungna svo sem magn blaðgrænu og tegundasamfélög á svæðinu (Ólafur K. Pálsson o.fl. 2006).

Eldri gögn sem liggja fyrir úr Íslandshafi og varða svifþörunga eru því hvorki mikil né fjölbreytt og aðallega bundin við leiðangra að vori eða hausti. Í vorleiðangri Hafrannsóknastofnunar hefur í einhverjum tilfellum verið farið yfir á grænlenka landgrunnið þar sem safnað hefur verið gögnum um frumframleiðni svifþörunga. Sömuleiðis hefur í vorleiðöngnum stundum verið farið norður fyrir 68°N, þ.e. út fyrir norðlenka landgrunnið að 69°N, en slíkt er þó ekki algengt. Í rannsóknaverkefnum Greenland Sea Project (GSP) voru á árunum 1987-1989 gerðar straummælingar og viðamiklar sjó- og vistfræðirannsóknir í vesturluta Íslandshafs (vestan Kolbeinseyjarhryggjar) norður á 72°N á helstu umhverfisþáttum ásamt svifþörungum og átu (Buch og Malmberg 1988). Söfnun gagna um svifþörunga sneru aðalega að mælingum á frumframleiðni, en einnig var safnað gögnum um magn blaðgrænu og tegundasamsetningu. Lítið hefur verið birt að þeim gögnum. Rannsóknir á samfélagi svifþörunga norðan Íslands á hafísárunum 1965-1969 gefa hugmynd um það svifþörungasamfélag sem búast má við í pólsjó þar sem hafís er ráðandi (Hafsteinn G. Guðfinnsson 1977).

Kristinn Guðmundsson (1998) hefur tekið saman langtíma frumframleiðni svifþörunga eftir svæðum við Ísland. Niðurstöður hans sýna að frumframleiðni kringum Ísland er mjög breytileg. Hún er mun minni utan við landgrunnið sunnanlands og norðan en á landgrunninu sjálfu. Hún er einnig talsvert minni utan landgrunnsins norðan lands ($< 6 \text{ mgC klst}^{-1} \text{ m}^{-3}$) en utan landgrunnsins sunnanlands ($< 8 \text{ mgC klst}^{-1} \text{ m}^{-3}$). Þessar niðurstöður eru í góðu samræni við niðurstöður Þórunnar Þórðardóttur (1977a, 1977b, 1984), sem fyrst vann slíka úttekt fyrir Íslandsmið ásamt samstarfsmönnum sínum.

Erlendar rannsóknir á svifþörungum í Íslandshafi virðast af skornum skammti ef marka má leit í alþjóðlegum greinasöfnum. Helst er að nefna rannsóknir á tegundasamsetningu svifþörunga og mælingar á frumframleiðni á fyrri hluta 20. aldar sem gerðar voru norðan Íslands að sunnanverðu Íslandshafi og vestur til Grænlands (Braarud 1935, Steemann-Nielsen 1935). Þá liggja fyrir talsverðar rannsóknir á lífríkinu í Grænlandshafi norðan Jan Mayen (sjá t.d. Schäfer o.fl. 2001) en þar eru aðstæður þó talsvert ólíkar því sem vænta má í Íslandshafi.

Þau gögn sem safnað var um svifþörunga í þessu verkefni eru því mjög mikilsverð viðbót við gagnasafn Íslandshafs. Mjög ítarlegum gögnum var safnað um lífmassa svifþörunga, mælt sem *a*-blaðgræna, á ýmsum skeiðum vaxtartíma þeirra frá vori til hausts. Þá voru gerðar mælingar á frumframleiðni og eru birtar tölur um dagsframleiðni svifþörunga á fermetra á mismunandi árstímum. Einnig fékkst nokkur vitneskja um tegundasamfélög svifþörunga frá byrjun vaxtarskeiðs þeirra í apríl, í vorblómanum og að sumri eftir að vorblóma lýkur. Niðurstöður þessara rannsókna eru kynntar í þessari grein.

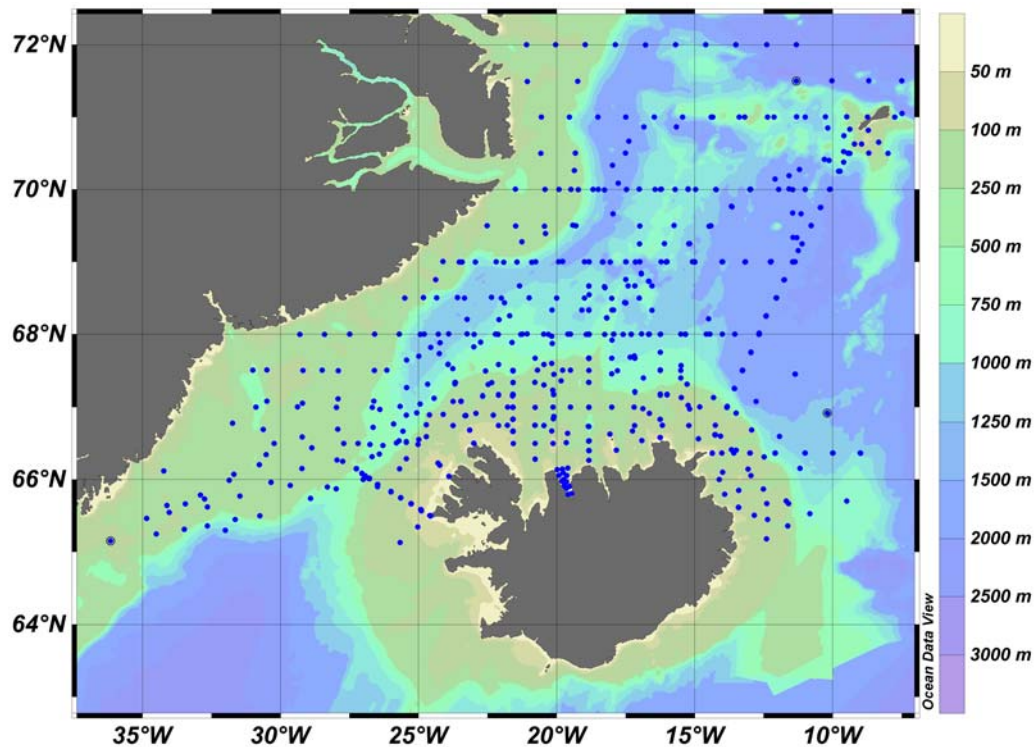
Efniviður og aðferðir

Gögnum um svifþörunga var safnað í 8 leiðöngnum í Íslandshafi og á nálægum hafsvæðum á árunum 2006 til 2008. Söfnun fór fram í febrúar, apríl, maí, júlí, ágúst og nóvember (1. mynd). Safnað var gögnum um magn blaðgrænu (*a*-blaðgræna mg m^{-3}) á öllum umhverfisstöðvum á fjórum til sex dýpum (0, 5, 10, 20, 30, 50 m). Ákveðið rúmmál (0,5–2 l) af sjó var síað gegnum GF/F Millipore síur sem síðan voru lagðar í 90% acetón og frystar. Sýnin voru ýmist mæld um borð eða í landi að leiðangri loknum í litrófsmæli (spectrophotometer) samkvæmt aðferð Strickland og Parsons (1972). Auk þessa liggja fyrir mælingar á flúrljómun svifþörunga (in vivo fluorescence) í lóðréttu sniði á hverri mælistöð þar sem hiti og selta voru mæld. Þessi gögn gáfu grófa hugmynd um dreifingu blaðgrænu í samfelldum ferli með dýpi frá yfirborði til botns.

Frumframleiðni (afkastamark svifþörunga) var mæld á 10 m dýpi á völdum stöðvum. Í sjósýni var bætt geislavirku kolefni (^{14}C) og sýnin ræktuð við mismunandi ljósstyrk í ræktunarskáp við það hitastig sem mældist í sjónum þar sem sýnin voru tekin. Sýnin voru síuð gegnum Membrane síur (0,2 μm) að lokinni ræktun og geislavirki þeirra mæld í Geigerteljara í landi. Frumframleiðni ($\text{mgC klst}^{-1} \text{ m}^{-3}$) svifþörunga var reiknuð út við tiltekið ljósmagn og í framhaldi af því reiknað afkastamark svifþörunga (Kristinn Guðmundsson o.fl. 2004).

Sjónkýpi var mælt með Secchi disk (sjónskífu) á hverri stöð meðan dagsbirtu naut og sjólag leyfði. Niðurstöður voru notaðar til að meta dýpt ljóstillífunarlagsins.

Sýnum til greininga og talninga á svifþörungum (háfsýni og sjósýni) var safnað á flestum umhverfisstöðvum. Annars vegar var safnað í



1. mynd. Rannsóknasvæðið í Íslandshafi og nálægum hafsvæðum ásamt stöðvum þar sem gerðar voru athuganir á svifþörungum í einum eða fleiri leiðöngrum.

Figure 1. The research area in The Iceland Sea and adjacent areas where data on phytoplankton was sampled in one or more cruises.

yfirborði með finriðnum háfi (20 μ m möskvi) og hins vegar voru tekin 2-5 sjótakasýni á staðaldýpum (0, 10, 20, 30, 50 m) frá yfirborði niður á 50 m dýpi. Sýnin voru varðveitt í hlutleystu formalíni (hexamin). Greining svifþörungna fór fram í landi Uppblönduðum talningasýnum var hellt í 50 ml sethólk. Þegar svifþörungarnir höfðu sest til voru þeir taldir og greindir í öfugri (inverted) smásjá (Utermöhl 1931, Tomas 1997, Thronsen o.fl. 2003). Niðurstöður eru gefnar sem frumufjöldi í lítra fyrir hverja tegund eða hóp svifþörungna. Háfsýni voru skoðuð á smásjargleri í venjulegri smásjá.

Í mörgum leiðangrana var safnað gögnum um hita, seltu og flúrljómun svifþörungna með sjálfvirku mælikerfi, sem mældi sjó frá sjóinntaki skipsins á um 4 metra dýpi og lýstu breytingum sem urðu á þessum þáttum á ferð rannsóknaskipanna.

Gerð er nánari grein fyrir rannsóknasvæði, leiðöngrum, söfnun, sýnatöku og úrvinnslu vegna svifþörungna í fyrstu greininni í þessu riti og vísast til hennar varðandi frekari útlistanir á leiðöngrum, söfnun og úrvinnslu vegna svifþörungna (Ólafur K. Pálsson o.fl. 2012).

Niðurstöður

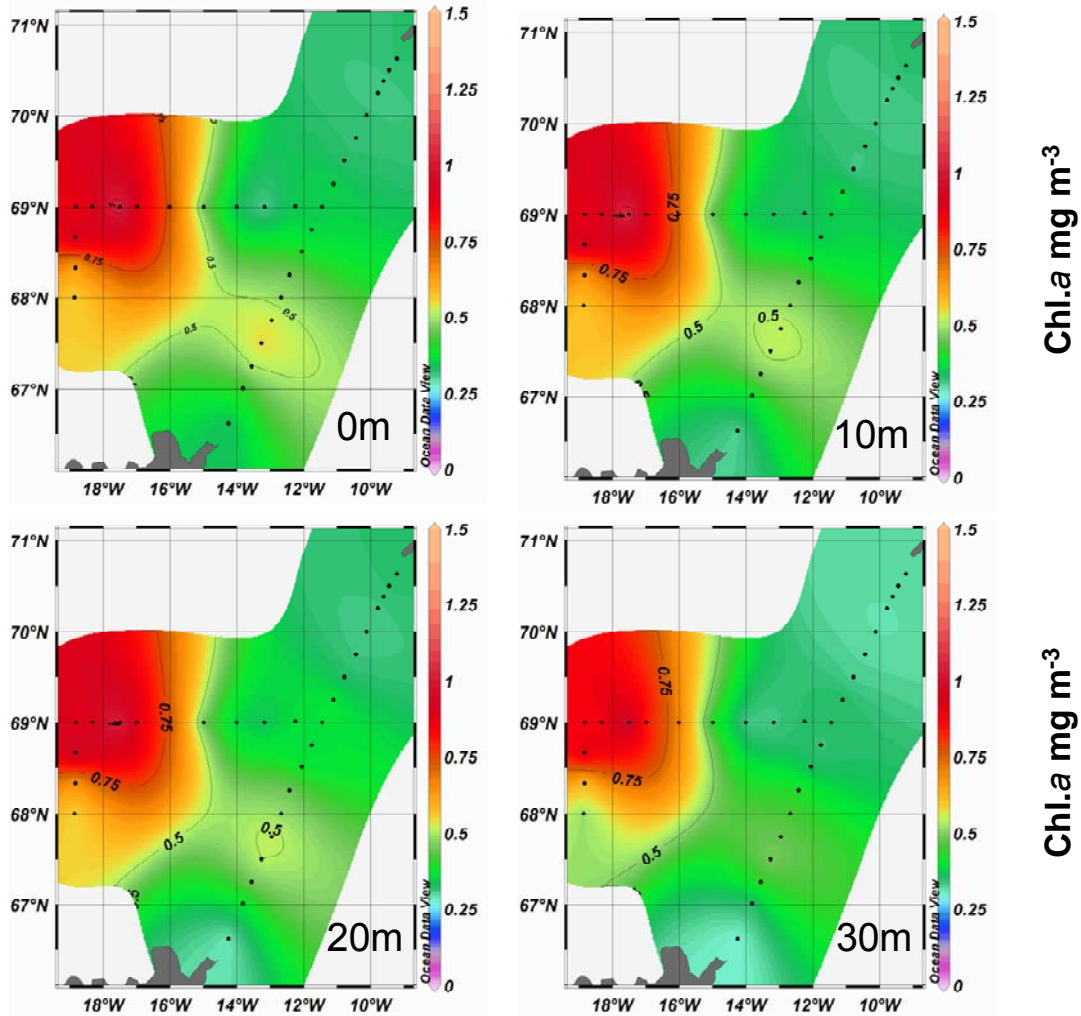
Þegar talað er um blaðgrænu í texta og ekki annað tekið fram er átt við *a*-blaðgrænu (Chlorophyll *a* = Chl.*a*) og er magn hennar gefið í einingunni mg m⁻³ eða mg m⁻².

Blaðgræna í febrúar

Blaðgrænumælingar liggja fyrir á sex stöðvum á sniði frá Siglunesi 8 að 69°N og þaðan til austurs á Langanessniði í febrúar 2006 í 0 og 20 m dýpi. Niðurstöður sýna að styrkur blaðgrænu var afar lágur (<0,1 mg m⁻³) á öllum stöðvum. Endurtekna blaðgrænumælingar á sömu stöðvum og dýpum í febrúar 2007 gáfu svipaðar niðurstöður (<0,1 mg m⁻³).

Blaðgræna í apríl

Blaðgrænegildi liggja fyrir á þremur sniðum (Siglunessniði, 69°N sniði og Langanessniði) á rannsóknasvæðinu 19.-24. apríl 2007. Gróður var kominn af stað og hæsti styrkur blaðgrænu fannst vestast á svæðinu (2. mynd) og í Austur Íslandsstraumnum. Lægri styrkur mældist næst landi við Langanes og í austanverðu Íslandshafi. Svipað magn af blaðgrænu var að finna í öllum mældýpum (2. mynd). Lítið var gengið á



2 mynd. Útbreiðsla *a*-blaðgrænu (Chl.a mg m^{-3}) á 0, 10, 20 og 30 m dýpi 19.-24. apríl 2007.
 Figure 2. Distribution of *Chl.a* (mg m^{-3}) in 0, 10, 20 and 30 m depth from 19.-24. April 2007.

næringarefni (N,P,Si) (Sólveig Ólafsdóttir 2012) og lagskipting var engin. Flúrljómunarmælingar sýndu að gróður var nokkuð jafndreifður með dýpi og náði víða niður á 60 til 80 m dýpi vestan við Kolbeinseyjarhrygg en mun dýpra austan við hann eða niður á 100-200 metra dýpi. Á því svæði var styrkur blaðgrænu þó mun minni ofan 30 m dýpis en vestan megin eins og sjá má á 2. mynd.

Blaðgræna í byrjun maí

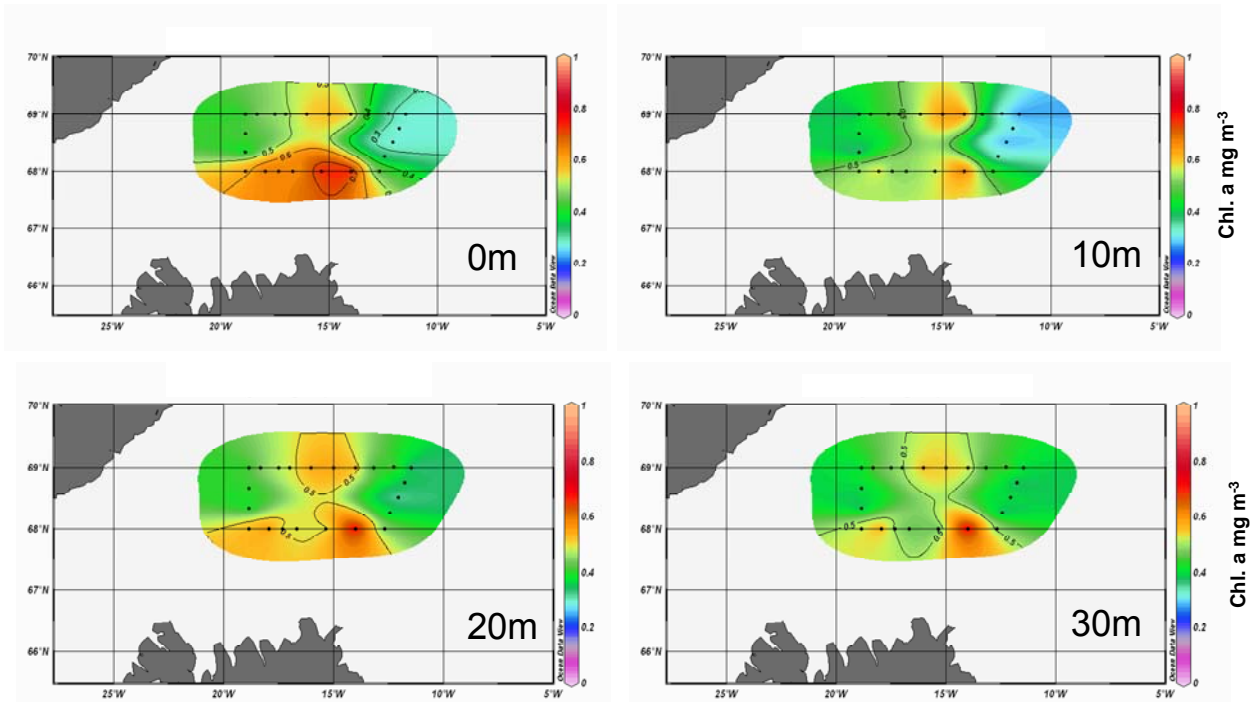
Blaðgrænegildi liggja fyrir á rannsóknasvæðinu 1.-5. maí 2008 á 68°N og 69°N sniðum og á Siglunessniði og Langanessniði sem tengja saman þau tvö fyrrnefndu (3. mynd). Gróður var kominn af stað á öllu svæðinu en þó var magn blaðgrænu enn lágt. Hæstan styrk blaðgrænu var að finna sunnan til á rannsóknasvæðinu (68°N) en lægri styrkur fannst norðar. Mjög lítil blaðgræna fannst í efstu 10 m í NA-hluta rannsóknasvæðisins en að öðru leyti var álfka

magn blaðgrænu að finna í öllum mældýpum. Styrkur næringarefna var sem næst í hámarki (Sólveig Ólafsdóttir 2011) og lagskipting var lítil sem engin. Flúrljómunarmælingar sýndu að gróður náði vel niður fyrir 100 m dýpi austan til á svæðinu en allt að 150-200 m dýpi vestan til.

Mikinn storm gerði á rannsóknasvæðinu á meðan leiðangurinn stóð yfir sem olli mikilli blöndun með dýpi. Þetta mátti sjá af útbreiðslu hita- seltu og flúrljómunar með dýpi á þeim stöðvum sem mældar voru eftir storminn.

Blaðgræna í seinni hluta maí

Blaðgrænumælingar liggja fyrir á 4 sniðum (Siglunessniði, 69°N sniði, Kolbeinseyjarhryggssniði og Langanessniði) frá 18.-26. maí 2006. Hár blaðgrænumstyrkur fannst við Langanes og um miðbik Siglunessniðs en þau hæstu komu fyrir á landgrunni Jan Mayen (4. mynd) þar sem magn gróðurs var nálægt því sem algengt er í vorhámarki ($> 10 \text{ mg m}^{-3}$). Í Íslands-



3. mynd. Útbreiðsla *a*-blaðgrænu (Chl. a mg m^{-3}) á 0, 10, 20 og 30 m dýpi 1.-5. maí 2008.
 Figure 3. Distribution of *Chl. a* (mg m^{-3}) in 0, 10, 20 and 30 m depth from 1.-5. May 2008.

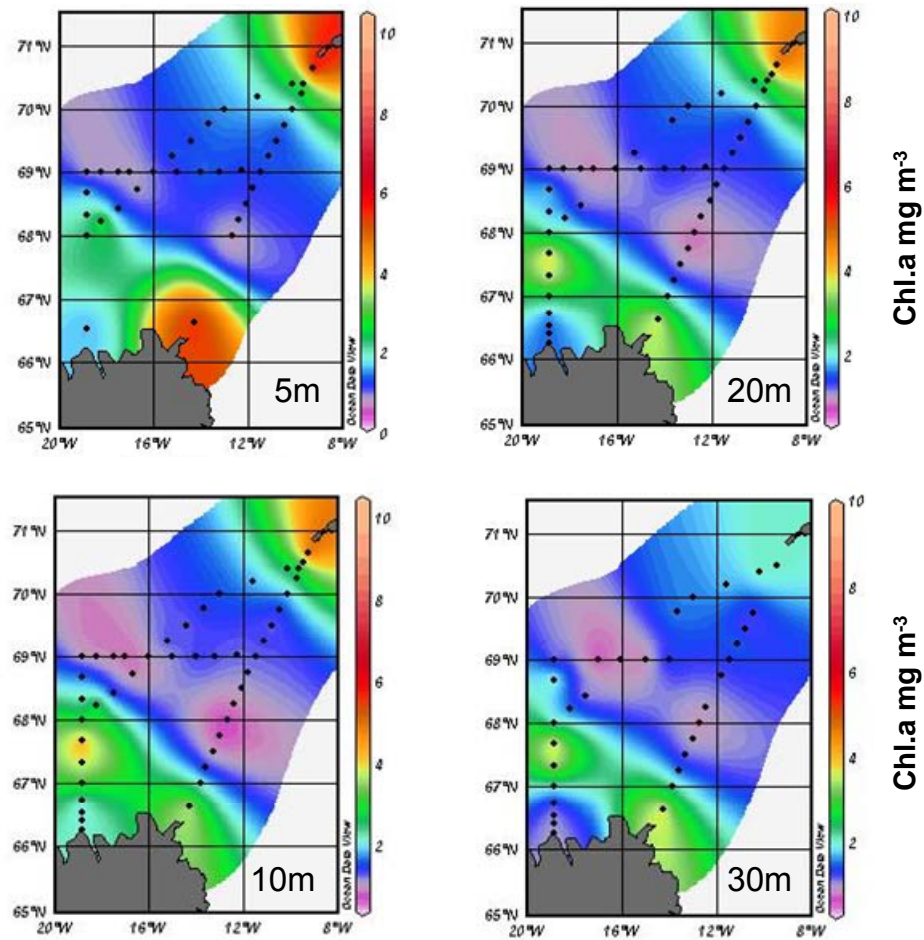
hafi var styrkur blaðgrænu mun lægri ($\leq 2 \text{ mg m}^{-3}$) og má ætla að vorhámark kísilþörungum hafi verið þar að einhverju leyti liðið hjá. Einkum á þetta við um svæðið austan við Kolbeinseyjarhrygginn, þar sem kísill var uppurinn niður á 50-60 m dýpi. Styrkur nítrats og fosfats var enn tiltölulega hár á öllu svæðinu, þó um þriðjungur vetrarforðans hafi þá þegar verið nýttur af vorgróðrinum (Sólveig Ólafsdóttir 2012). Styrkur blaðgrænu var nokkuð svipaður í öllum mældýpum í Íslandshafi ef frá er talið norðaustur svæði hafsins, austan Kolbeinseyjarhryggs og norðan 69°N , þar sem meira magn blaðgrænu var að finna í 30 m dýpi en ofar. Það bendir einnig til þess að gróðri, einkum kísilþörungum, fari hnignandi nálægt yfirborði.

Flúrljómunarmælingar voru gerðar á öllum stöðvum. Á Siglunessniði sýndu þær að gróður var fyrst og fremst að finna ofan við 50 m dýpi enda hafði þar myndast nokkur lagskipting. Á 69°N sniði var allur gróður ofan við lagskiptingu sem náði á 50-60 m dýpi nema á austustu stöðinni, þar sem hann var jafndreifður frá yfirborði niður á 100 m dýpi. Skýringin á þessu er sennilega sú að mikinn storm gerði áður en mælt var á þeirri stöð, sem braut upp lagskiptingu og jafnblandaði gróðrinum í vatnsúlunni. Áhrif stormsins komu einnig vel fram í hita og seltu á stöðinni sem voru jafndreifð frá yfirborði og niður úr. Á suðurhluta Kolbeinseyjar-

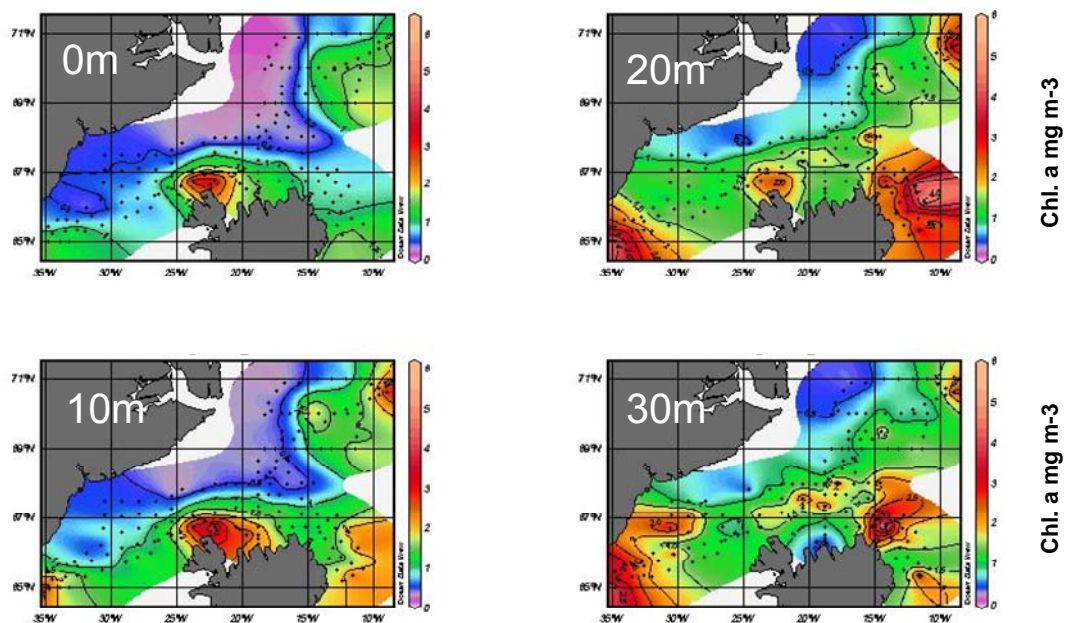
hryggssniðs náði gróður niður á 50 m dýpi en heldur dýpra (50-70 m) eftir því sem norðar dró. Á nyrstu fjórum stöðvum Langanessniðs var mestur gróður fyrir ofan 50-60 metra dýpi. Mælingar á öðrum stöðvum á sniðinu fóru fram eftir áður nefndan storm af NA, sem greinilega hafði valdið blöndun á svæðinu. Afleiðing þessa kom fram í jafndreifðum flúrljómunargildum frá yfirborði niður á 70-100 m dýpi á þessum stöðvum. Hiti og selta breyttust einnig lítið í sama dýptarbili.

Blaðgræna í júlí

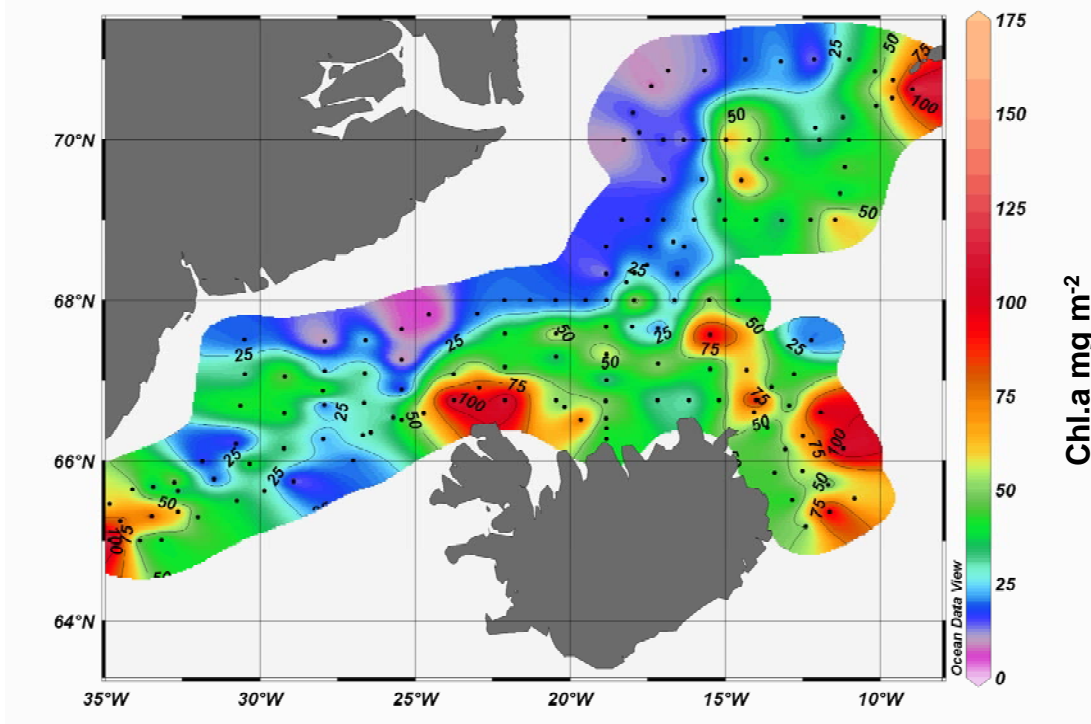
Styrkur blaðgrænu á rannsóknasvæðinu í júlí 2006 er sýndur á 5. mynd. Styrkur blaðgrænu var mestur við Vestfirði, fyrir austan Ísland, syðst á grænlenka landgrunninu og við Jan Mayen. Styrkur blaðgrænu var minni á norðlenka landgrunninu, vestur af Vestfjörðum og austan til í Íslandshafi. Athyglisvert er að nokkurn gróður ($1-2 \text{ mg m}^{-3}$) er að finna austan við Kolbeinseyjarhrygg í Íslandshafi enda var þar enn að finna næringarefni (nítrat og fosfat) (Sólveig Ólafsdóttir 2012) í nokkrum styrk þó kísill hafi verið uppurinn. Lægstur var styrkur blaðgrænu í vesturhluta Íslandshafs þ.e. vestan við Kolbeinseyjarhrygginn einkum í efstu 10-15 metrunum (5. mynd). Dýpra var gróður örlítið meiri á þessum slóðum en þó sáralítið neðan við 30 m dýpi. Mjög sterk lagskipting ríkti á



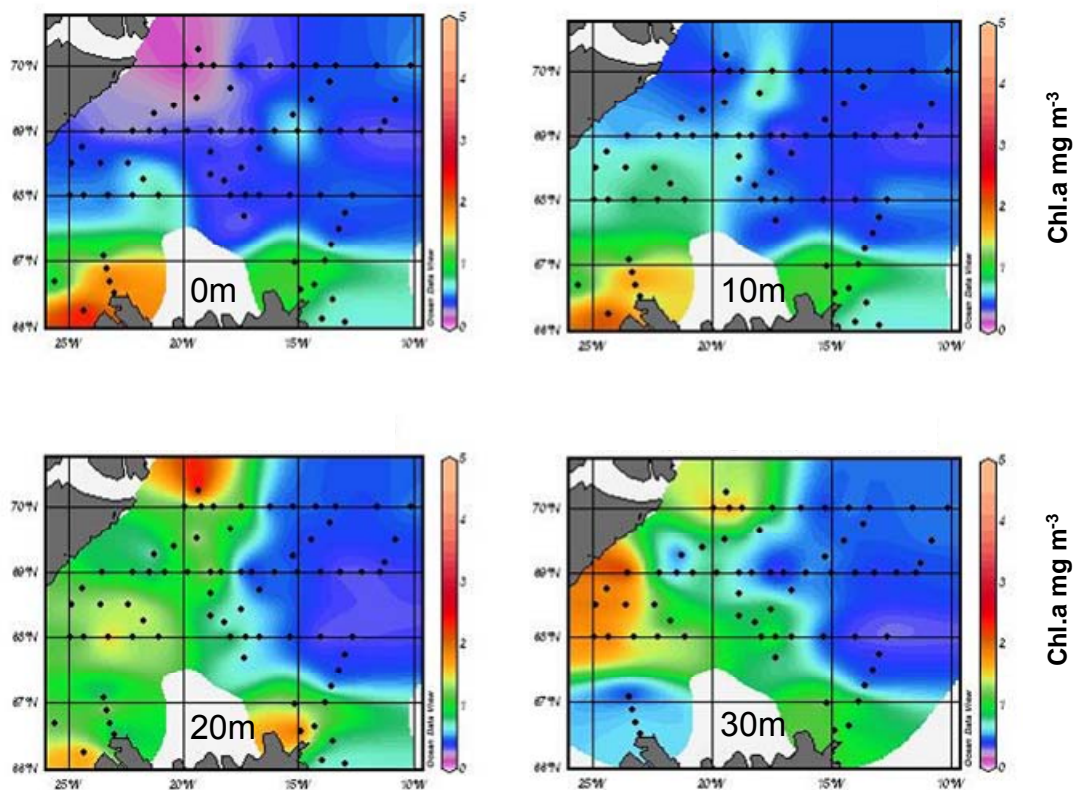
4. mynd. Útbreiðsla *a*-blaðgrænu ($\text{Chl.}a \text{ mg m}^{-3}$) á 5, 10, 20 og 30 m dýpi 18.-26. maí 2006.
 Figure 4. Distribution of *Chl.a* (mg m^{-3}) in 5, 10, 20 and 30 m depth from 18.-26. May 2006.



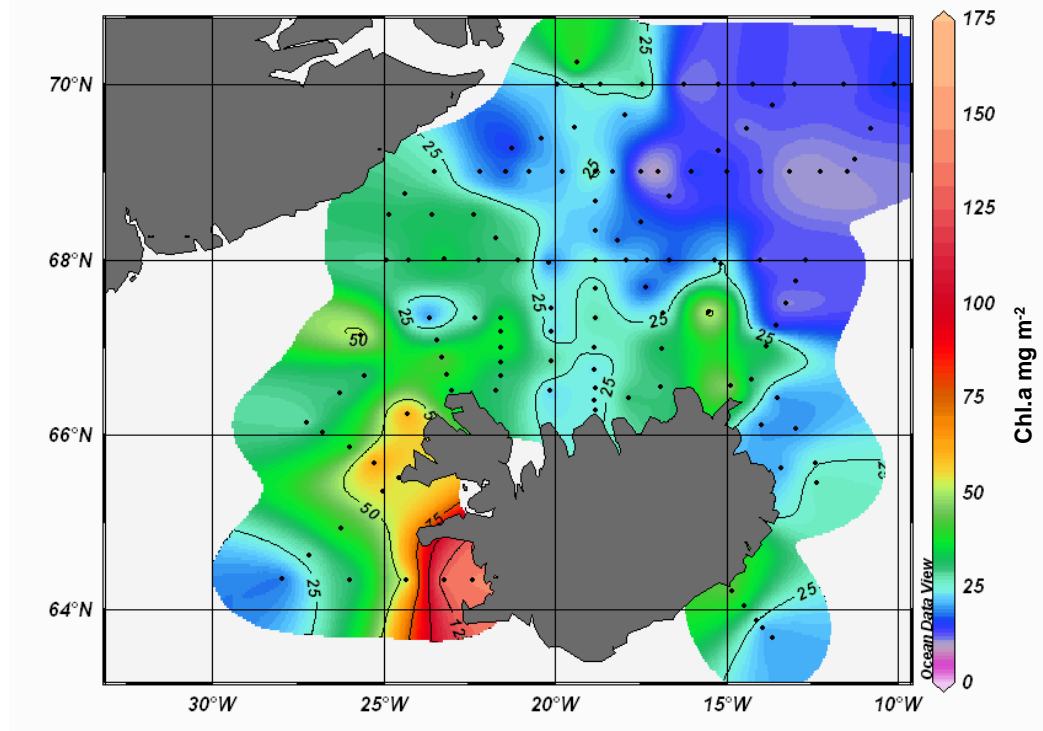
5. mynd. Útbreiðsla *a*-blaðgrænu ($\text{Chl.}a \text{ mg m}^{-3}$) á 0, 10, 20 og 30 m dýpi á rannsóknasvæðinu í júlí 2006.
 Figure 5. Distribution of *Chl.a* (mg m^{-3}) in 0, 10, 20 and 30 m depth in the research area in July 2006.



6. mynd. Útbreiðsla heildarmagns *a*-blaðgrænu (Chl. *a* mg m⁻²) í 0-30 m dýpi á rannsóknsvæðinu í júlí 2006.
 Figure 6. Distribution of integrated Chl. *a* (mg m⁻²) in 0-30 m depth in the research area in July 2006.



7. mynd. Útbreiðsla *a*-blaðgrænu (Chl. *a* mg m⁻³) á 0, 10, 20 og 30 m dýpi í ágúst 2007.
 Figure 7. Distribution of Chl. *a* (mg m⁻³) in 0, 10, 20 and 30 m depth in the research area in August 2007.



8. mynd. Útbreiðsla heildarmagns α -blaðgrænu (Chl.a mg m⁻²) í 0-30 m dýpi á rannsóknasvæðinu í ágúst 2007.
Figure 8. Distribution of integrated Chl. a (mg m⁻²) in 0-30 m depth in the research area in August 2007.

svæðinu norðan við íslenska landgrunnið (norðan 68°N) niður á um 30 m dýpi.

Þegar reiknað er heildar magn blaðgrænu undir einum fermetra í 0–30 m dýpi (mg m⁻²) á rannsóknasvæðinu (6. mynd) fæst svipuð útbreiðsla og sýnd var fyrir dýpsdreifingar blaðgrænu og samsvarar vel útbreiðslu næringarefna í sama dýptarbili (Sólveig Ólafsdóttir 2012).

Blaðgræna í ágúst 2007

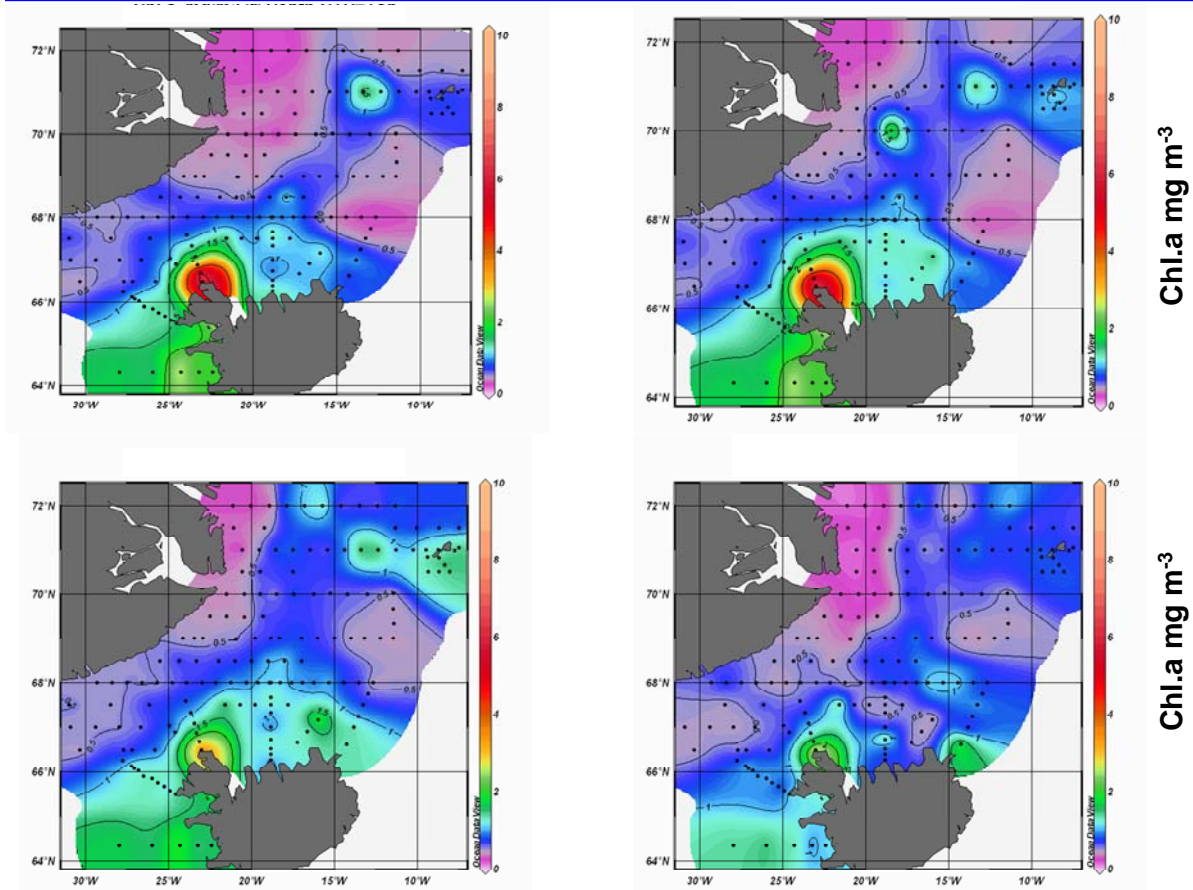
Styrkur blaðgrænu á rannsóknasvæðinu í ágúst 2007 er sýndur á 7. mynd. Í yfirborði (0 og 10 m) var styrkur blaðgrænu mestur við Vestfirði og við Norðausturland. Gróður var mjög lítill í austanverðu Íslandshafi og á 0 og 10 m dýpi á svæðinu vestan Kolbeinseyjarhryggs til Grænlands. Gróður var á hinn bóginn nokkur í neðri dýpum (20 og 30 m dýpi) í austur Grænlandsstraumnum alveg að Vestfjörðum og einnig við norðaustur land. Nær enginn gróður fannst neðan við 30–40 m dýpi á öllu rannsóknasvæðinu. Styrkur næringarefna var mjög lítill í yfirborðslögum í vestanverðu Íslandshafi og lagskipting mjög sterk niður á um 30 m dýpi. Lagskipting var einnig sterk austan við Kolbeinseyjarhrygg en þar fundust leifar af nær-ingarefnum (níturat og fosfat) (Sólveig Ólafsdóttir 2012) í norðaustanverðu hafinu en

gróður var samt sem áður mjög lítill. Á þessu svæði var nokkuð dýrasvif (Ástþór Gíslason & Teresa Silva 2012) sem hugsanlega hefur haldið gróðrinum í lágmarki með beit. Blaðgrænu sýni sem safnað var á stöðvum á norðlenska landgrunninu eyðilögðust en styrkur blaðgrænu á þeim slóðum hefur sennilegast verið svipaður og fannst við Norðausturland (7. mynd) ef marka má flúrljómunar mælingar sem gerðar voru á þessum slóðum.

Dreifing heildarmagns blaðgrænu (mg m⁻²) fyrir allt rannsóknasvæðið frá yfirborði að 30 m dýpi er sýnd á 8. mynd

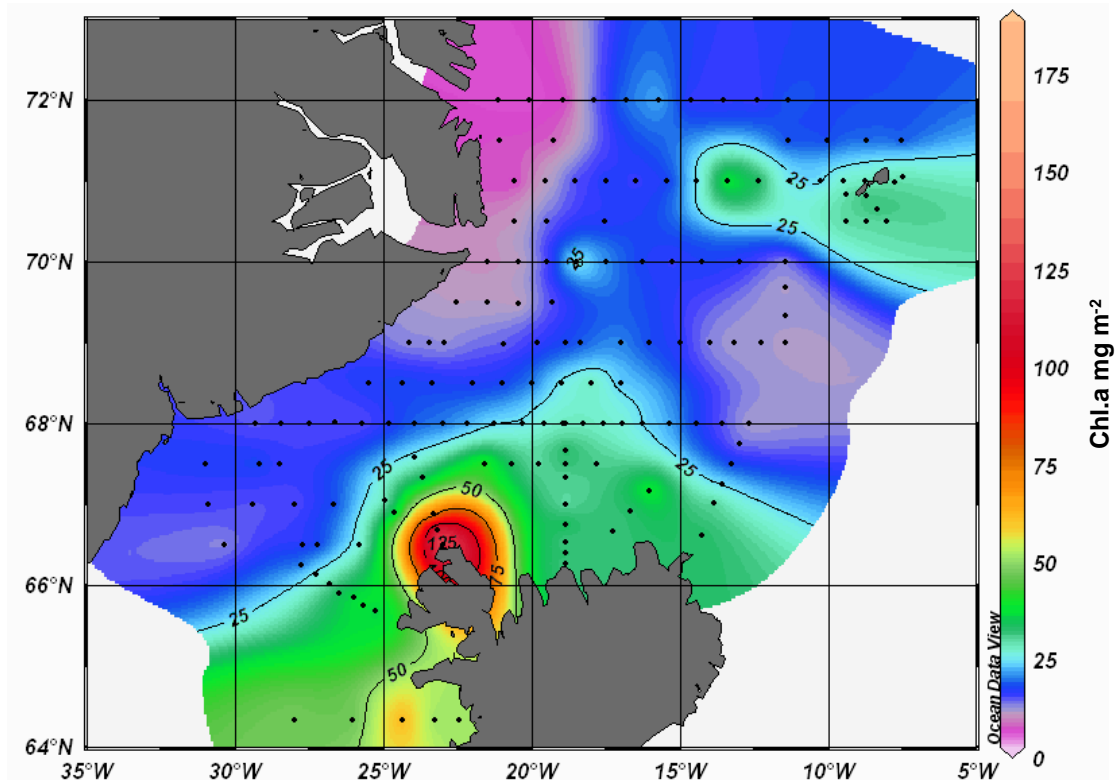
Blaðgræna í ágúst 2008

Styrkur blaðgrænu á rannsóknasvæðinu í ágúst 2008 er sýndur á 9. mynd. Litinn gróður (α -blaðgræna <1 mg m⁻³) var að finna í öllu Íslandshafi í öllum dýpum ef frá er skilið svæðið við Jan Mayen á 20 m dýpi. Í Austur-Grænlandsstraumnum var styrkur blaðgrænu enn lægri en austar í Íslandshafi. Mjög sterk lagskipting ríkti á þessu svæði niður á 30 m dýpi og næringarefni voru uppurin (Sólveig Ólafsdóttir 2012). Mestur gróður fannst á landgrunninu vestan við Ísland og við Vestfirði og inni á norðlenska landgrunninu. Reiknað heildarmagn blaðgrænu (mg m⁻²) frá yfirborði að 30 m dýpi er sýnd á 10. mynd og kemur vel heim



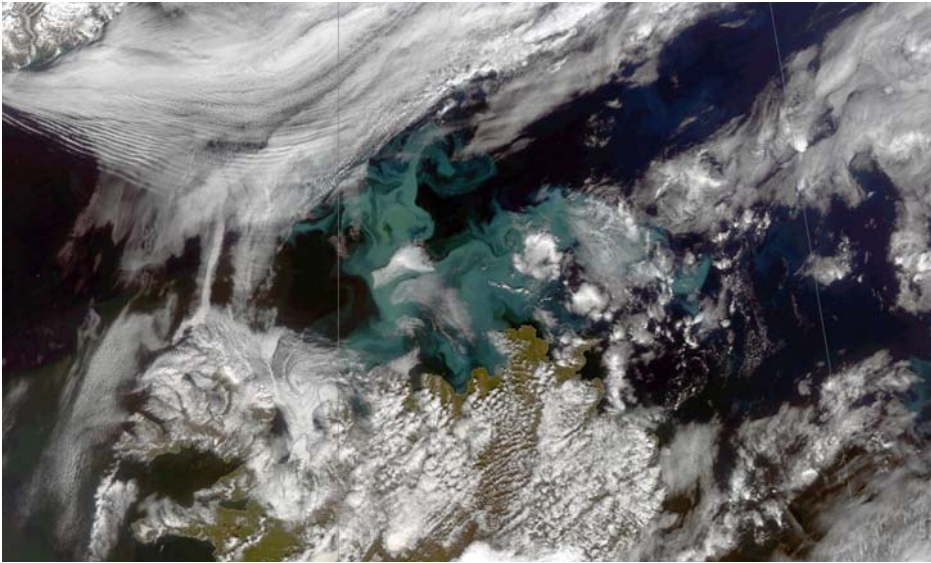
9 mynd. Útbreiðsla *a*-blaðgrænu (Chl.a mg m^{-3}) á 0, 10, 20 og 30 m dýpi í ágúst 2008.

Figure 9. Distribution of *Chl.a* (mg m^{-3}) in 0, 10, 20 and 30 m depth in the research area in August 2008.



10. mynd. Útbreiðsla heildarmagns *a*-blaðgrænu (Chl.a mg m^{-2}) í 0-30 m dýpi á rannsóknasvæðinu í ágúst 2008.

Figure 10. Distribution of integrated *Chl.a* (mg m^{-2}) in 0-30 m depth in the research area in August 2008.



11. mynd. Útbreiðsla kalksvifþörungna (*Emiliania huxleyi*-hvítgrænleitur flekkur) á rannsóknasvæðinu norðan Íslands 10. ágúst 2008. (Mynd birt með leyfi MODIS Rapid Response Project of NASA/GSFC).

Figure 11. Distribution of *coccolithophorids* (*Emiliania huxleyi*-whitegreen colour) in the research area north of Iceland 10th of August 2008. (Image courtesy of MODIS Rapid Response Project of NASA/GSFC).

við lágan styrk næringarefna á þessu svæði (Sólveig Ólafsdóttir 2012).

Frá Siglunessniði og austur fyrir Melrakkasléttu var mikill kalkþörungaflekkur með svifþörungnum *Emiliania huxleyi*. Flekkurinn náði frá yfirborði niður á 20 m dýpi þar sem geysisterk lagskipting ríkti (Hafsteinn G. Guðfinnson o.fl. 2009). Þessi flekkur, sem var hvítgrænleitur á litinn, kom mjög vel fram á gerfihnattamyndum (11. mynd).

Blaðgræna í nóvember

Mælingar liggja fyrir á blaðgrænu á tveimur stöðvum í nóvember 2006, þ.e. á stöð 8 á Siglunessniði og á stöð 6 á Langanessniði. Báðar eru þær staðsettar á 68°N. Gerðar voru mælingar í 0 og 20 m dýpi. Styrkur blaðgrænu var lágur (0,1-0,2 mg m⁻³) eins og búast mátti við þar sem komið er fram á vetur og birta því af skornum skammti. Styrkurinn var þó hærri heldur en mældist í febrúar.

Frumframleiðni

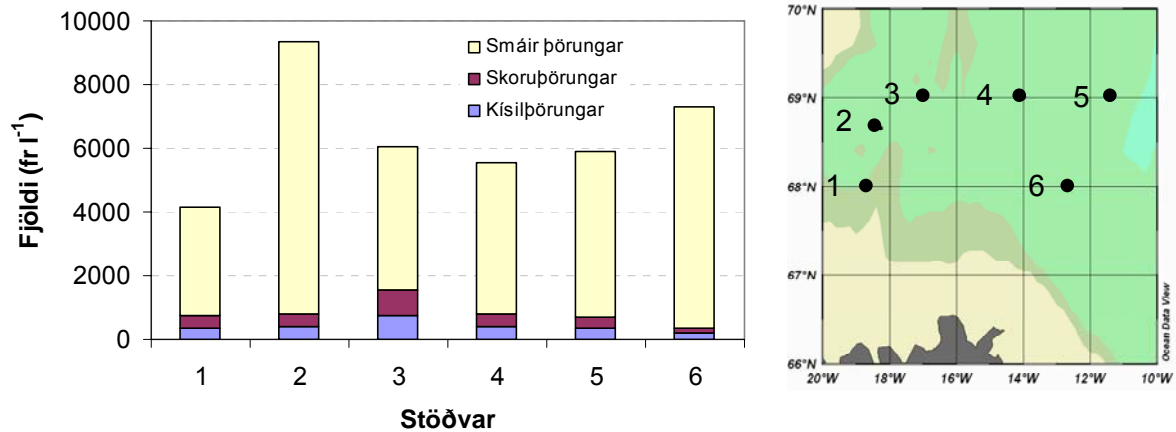
Frumframleiðni var reiknuð undir einum fermetra á dag (gC m⁻² dag⁻¹), þar sem afkastamark svifþörungna var mælt í Íslandshafi, samkvæmt aðferð sem þróuð var af Kristni Guðmundssyni og fleirum (2004). Dýpi ljóstillífunarlagsins var miðað við 1% ljósdýpi út frá sjónþýpmælingu. Niðurstöður sýna að í seinni hluta apríl 2007 var frumframleiðnin í sunnanverðu Íslandshafi (68°-69°N) frá 0,2 - 0,3 gC m⁻² dag⁻¹ að undantekinni einni stöð þar sem frumframleiðni var meiri. Í byrjun maí 2008 var framleiðnin <0,3 gC m⁻² dag⁻¹ í sunnanverðu Íslandshafi þ.e. á svipuðu róli og í apríl 2007 enda gróðurmagn svipað. Seinni

hlutann í maí 2006, þegar vorgróður var í fullum gangi, var framleiðnin í Íslandshafi (68° N-70°N) frá 0,3 -2,5 gC m⁻² dag⁻¹ um miðbik hafsins en hærri þegar nær dró landgrunni Íslands og Jan Mayen. Dagsframleiðnin nærri landgrunni Jan Mayen var rúmlega 2 gC m⁻² dag⁻¹ en hefur sennilega verið talsvert meiri á landgrunni eyjarinnar en þar var magn blaðgrænu mjög hátt. Þar liggja hins vegar ekki fyrir mælingar á frumframleiðni. Á landgrunninu norðan Íslands mældist dagsframleiðni tæp 4 gC m⁻² dag⁻¹.

Frumframleiðni í júlí 2006 var lág í vestanverðu Íslandshafi (<0,5 gC m⁻² dag⁻¹) en hærri austan til í hafinu (0,5 -1,5 gC m⁻² dag⁻¹) sem er í samræmi við dreifingu blaðgrænu og næringarefna á þessum tíma. Framleiðni í ágúst 2007 var mjög lág í Íslandshafi (0,1-0,4 gC m⁻² dag⁻¹) enda magn blaðgrænu mjög lítið á öllu svæðinu. Framleiðni í ágúst 2008 var fremur lítil á öllu svæðinu sem er einnig í samræmi við lág blaðgrænugildi. Framleiðni á 68°N sniði var frá 0,16-0,59 gC m⁻² dag⁻¹ lægst vestast. Á 69°N sniði var framleiðni 0,16-0,42 gC m⁻² dag⁻¹, sömuleiðis lægst vestast á svæðinu. Á 70°N, 71°N og 72°N sniðum var frumframleiðni 0,13-0,36 gC m⁻² dag⁻¹, lægri vestan til á svæðinu en austar. Framleiðni á landgrunninu norðan lands var á sama tíma nokkru hærri en í Íslandshafi (0,6 gC m⁻² dag⁻¹) og einnig hærri en við Jan Mayen (0,3-0,4 gC m⁻² dag⁻¹).

Samfélög svifþörungna

Greiningar og talningar á svifþörungum hafa verið gerðar á sýnum úr nokkrum leiðöngurum í Íslandshafi á mismunandi árstímum, aðallega úr 10 m dýpi en einnig af 30 m dýpi. Þar sem úr-



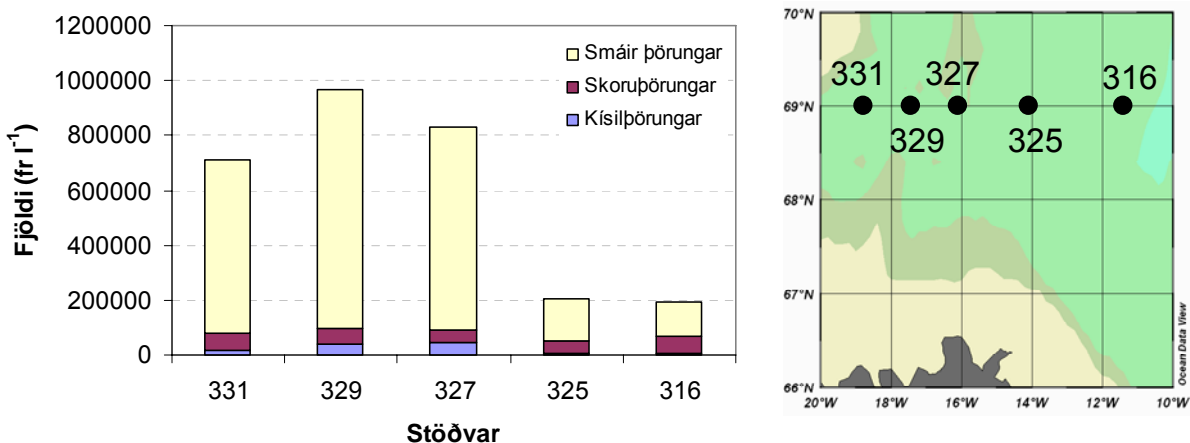
12. mynd. Fjöldi fruma í (frumur lítra⁻¹) af hverjum þörungahópi (Smáir þörungar, Skorupþörungar, Kísilþörungar) á 0 m dýpi á sniði sem liggur frá Siglunesi 8 (st.1) um 69°N snið á Langanes snið og endar á Langanesi 6 (st.6) í febrúar 2006.

Figure 12. Cell number (cells liter⁻¹) of phytoplankton groups in surface water samples at transect from Siglunes at 68°N (st.1) to 69°N to the section Langanes in February 2006 (Smáir þörungar = Flagellates and monads; Skorupþörungar = Dinoflagellates; Kísilþörungar = Diatoms).

vinnsla úr slíkum sýnum er mjög tímafrek hafa verið valin út sýni sem varpað geta ljósi á samfélagsgerð svifþörungna í Íslandshafi, en úrvinnsla úr sýnum af öðrum svæðum látin bíða betri tíma. Lögð hefur verið áhersla að kanna samsetningu svifsins á Siglunessniði (ysta hluta), sniði á 69°N, sniði á Kolbeinseyjarhrygg og sniði NA frá Langanesi, einkum á þeim stöðvum þar sem mælingar á frumframleiðni hafa farið fram. Auk þess hefur verið bætt við stöðvum sem liggja á milli frumframleiðnistöðva til að ekki sé alltof langt á milli þeirra sýna sem greind hafa verið og talin. Í framsetningu niðurstaða er svifþörungum skipt í þrjá hópa, kísilþörungna (*Diatoms*), skorupþörungna (*Dinoflagellates*) og smáa þörungna (*Flagellates*

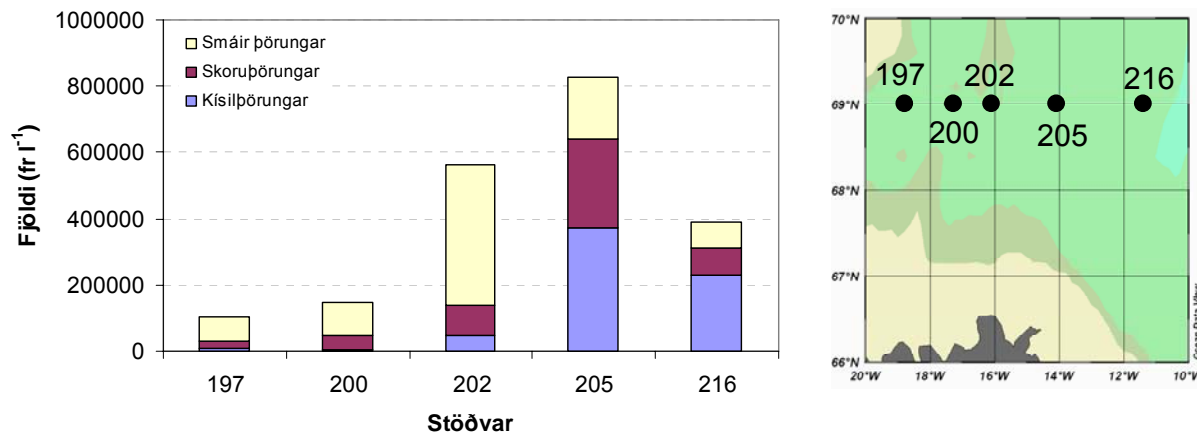
and monads) sem oft eru með svipum en ekki alltaf og geta tilheyrt mörgum flokkum svifþörungna. Þeir eru í flestum tilfellum minni en 10 μm að stærð en megin hluti þeirra er gjarnan minni en 5 μm að stærð. Niðurstöður verða raktar í tímaröð og aðaláherslan lögð á niðurstöður talninga og greininga frá sniði á 69°N í Íslandshafi. Þá verða einnig tíundaðar niðurstöður frá öðrum sniðum einkum að vorlagi. Gerð er tilraun til að fylgja eftir vaxtarferli svifþörunganna og breytingum í samfélagsgerðinni frá vori fram á sumar.

Í febrúar 2006 liggja fyrir greiningar úr yfirborðssýnum á 6 stöðvum af Siglunes-, 69°N- og Langanessniði NA (12. mynd). Frumu-fjöldi er mjög lítill eins og vænta mátti þar sem birta er



13. mynd. Fjöldi fruma (frumur lítra⁻¹) í hverjum þörungahópi (Smáir þörungar, Skorupþörungar, Kísilþörungar) á 10 m dýpi á 69°N sniði í apríl 2007.

Figure 13. Cell number (cells liter⁻¹) of phytoplankton groups in samples from 10 m depth at 69°N transect in April 2007 (Smáir þörungar = Flagellates and monads; Skorupþörungar = Dinoflagellates; Kísilþörungar = Diatoms).



14. mynd. Fjöldi fruma (frumur lítra⁻¹) í hverjum þörungahópi (Smáir þörungar, Skorubörungar, Kísilþörungar) á 10 m dýpi á 69°N sniði í seinni hluta maí 2006.

Figure 14. Cell number (cells liter⁻¹) of phytoplankton groups in samples from 10 m depth at 69°N transect in late May 2006 (Smáir þörungar = Flagellates and monads; Skorubörungar = Dinoflagellates; Kísilþörungar = Diatoms).

mjög takmarkandi þáttur fyrir svifþörungana á þessum tíma árs. Það kemur samt á óvart að finna kísilþörungana, skorubörungana og smáa svifþörungana í öllum sýnum á svæðinu. Frumufjöldi kísilþörungana er lítill, aðeins nokkur hundruð frumur í lítra, en tuttugu og fjórar tegundir fundust sem eru mun fleiri en búist var við. Flestar tegundir voru af ættkvíslum *Chaetoceros* og *Pseudo-nitzschia*. Í hópi skorubörungana bar mest á ófrumbjarga skorubörungum en af frumbjarga tegundum var mun minna. *Dinophysis acuminata* fannst á mörgum stöðvanna en í litlu magni. Í hópnum smáir svifþörungar var langmest af ógreindum frumbjarga tegundum. Af öðrum tegundum sem komu fyrir í mörgum sýnanna voru kalksvifþörungarnir *Coccolithus pelagicus* og *Emiliania huxleyi* algengastir. Fjöldi bifdýra var lítill í öllum sýnum.

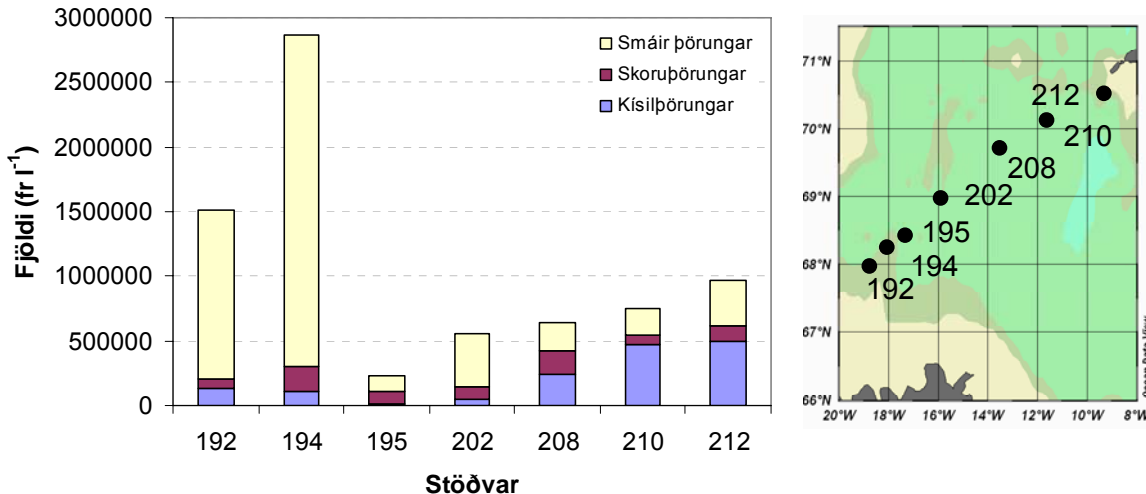
Seinni hluta apríl 2007 liggja fyrir greiningar á sýnum á 5 stöðvum á 69°N sniði úr 10 m dýpi (13. mynd). Lagskipting var mjög veik og því má ætla að niðurstöður greininga úr 10 m dýpi séu mjög lýsandi fyrir þá svifþörungana sem finnast innan ljóstillifunarlagsins. Vestast á sniðinu voru kísilþörungar byrjaðir vorvöxt og var fjöldi fruma 20 til 50 þúsund í lítra en fjöldi þeirra minnkaði eftir því sem austar dró á sniðinu (< 5 þúsund fr l⁻¹). Smáir svifþörungar voru algengastir á vesturhluta sniðsins og upp á Kolbeinseyjarhrygginn en fjöldi þeirra var mun minni austan til í Íslandshafi. Fjöldi skorubörungana var nokkuð svipaður á öllu sniðinu og var stærstur hluti þeirra (80-90% af fjölda) sennilega ófrumbjarga frumur. Fjöldi bifdýra var mestur (2500 fr l⁻¹) vestast á sniðinu en mun minni á öðrum

stöðvum (um 1000 fr l⁻¹).

Helstu kísilþörungar vestan til á sniðinu að Kolbeinseyjarhrygg voru *Chaetoceros furcellatus* og *Thalassiosira* tegundir (*T. gravida*). Í mestum fjölda á sniðinu var örsmá staflaga (pennate) kísilþörungur, sem ekki var hægt að greina til tegundar en var frá 40–80% af fjölda kísilþörungana. Austan til komu til skjalanna stærri staflaga kísilþörungakeðjur (*Fragilariopsis oceanica* og *Pauliella taeniata*) sem varla fundust vestan til á sniðinu en fjöldi þeirra var lítill. Í hópnum smáir svifþörungar var *Phaeocystis pouchetii* algengastur af einstökum tegundum, einkum um miðbikið og vestan til á sniðinu. Ekki reyndist unnt að greina stóran hluta af skorubörungum (75-90% af fjölda) en af greinilegum tegundum fannst *Prorocentrum balticum* (frumbjarga) á öllu sniðinu og í allmiklu magni um miðbikið og á austari hlutanum (5–10% af fjölda). Ein tegund kalksvifþörungana, *Coccolithus pelagicus*, fannst á öllum stöðvum þó í litlum mæli væri.

Í síðari hluta maí liggja fyrir greiningar af 5 stöðvum á 69°N sniði í 10 m dýpi (14. mynd). Vestast á sniðinu (st. 197 og 200) var lítið um svifþörungana. Aðalhöparnir þar voru smáir svifþörungar og ófrumbjarga skorubörungar en kísilþörungar fundust varla. Yfir Kolbeinseyjarhryggnum (st. 202) og austar í Íslandshafi (st. 205 og 216) bar mun meira á kísilþörungum í svifinu en fjöldi smárra svifþörungana var mestur á st. 202 og skorubörungana á st. 205.

Helstu tegundir kísilþörungana voru staflaga keðjur, *Fragilariopsis oceanica*, *F. cylindrus* og *Pauliella taeniata* sem fundust á öllu sniðinu. Fjöldi þeirra fer vaxandi frá vestri til austurs og



15. mynd. Fjöldi fruma (frumur lítra⁻¹) af hverjum þörungahópi á 10 m dýpi á Kolbeinseyjarhryggssniði í maí 2006. (Smáir þörungar, Skorupþörungar; Kísilþörungar)

Figure 15. Cell number ((cells liter⁻¹) of phytoplankton groups in samples from 10 m depth at a transect along the Kolbeinseyjarhryggssniði in late May 2006 (Smáir þörungar = Flagellates and monads; Skorupþörungar = Dinoflagellates; Kísilþörungar = Diatoms).

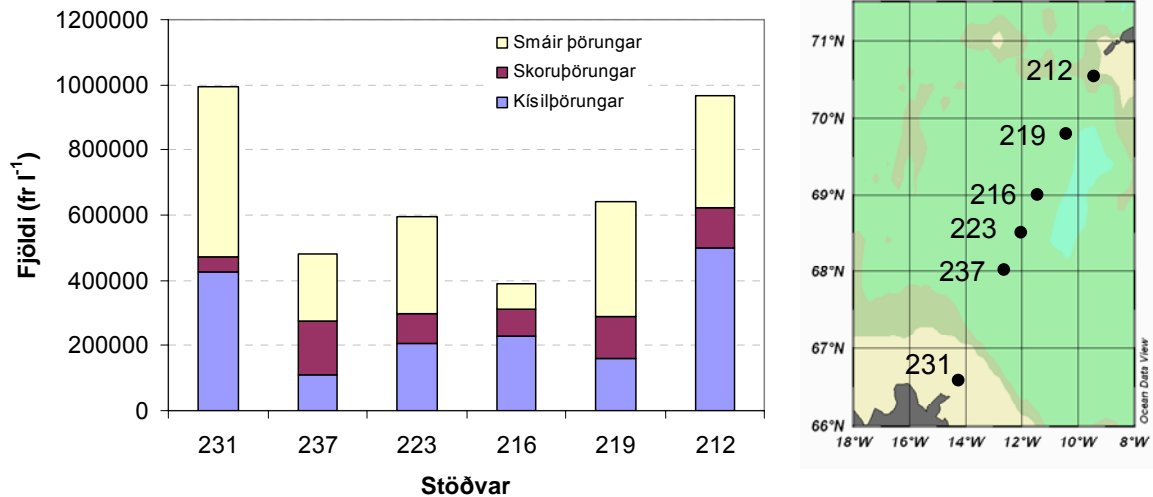
þær mynda uppistöðu kísilþörungum austan til á sniðinu. Ýmsar kísilþörungategundir, sem algengar eru í vorsvifinu norðanlands, fundust einnig á sniðinu en í litlu magni t.d. *Thalassiosira*- og *Chaetoceros*-tegundir. Nokkuð var gengið á kísilforðann austan til á sniðinu en kísilstyrkur var enn nokkur vestan megin hryggjar. Þetta bendir til þess að vorvöxtur kísilþörungum hafi verið langt kominn austan megin í Íslandshafi en eigi en eftir að aukast vestan megin og ná vorhámarki. Innan skorupþörungum bar mest á tegundum sem ekki var unnt að greina til tegunda og sennilega voru að stórum hluta ófrumbjarga. *Prorocentrum balticum* var algengastur af frumbjarga greinilegum tegundum. Fjöldinn var þó lítill í heildina og meiri austan megin á sniðinu. Fjöldi smárra svifþörungum var mestur yfir hryggnum og síthvorum megin við hann en stærstur hluti þeirra voru örsmáar tegundir (< 5 µm). Af kalksvifþörungum bar mest á *Coccolithus pelagicus* en fjöldi hans var lítill vestan megin en fór vaxandi austur eftir sniðinu og var mestur á austustu stöðvunum. Talningar á bifdýrum sýndu að meira var af þeim vestan við Kolbeinseyjarhrygg (>1500 fr l⁻¹) en austan hans (<1500 fr l⁻¹).

Í síðari hluta maí liggja fyrir greiningar af svifþörungum frá 7 stöðvum á Kolbeinseyjarhryggssniði á 10 m dýpi (15. mynd). Syðst á sniðinu var heildarfjöldi svifþörungum mestur á stöðvum 192 og 194. Aðalþópurinn var smáir svifþörungar og munar þar mest um tegundina *Phaeocystis pouchetii* sem kom fyrir í miklum

fjölda. Fjöldi smárra svifþörungum dvínar eftir því sem norðar dregur á sniðinu. Fjöldi kísilþörungum var nokkur syðst á sniðinu, en minnstur yfir hryggnum. Fyrir norðan 69°N fór fjöldi þeirra vaxandi og var mestur í nánd við Jan Mayen landgrunnið þar sem þeir töldust í hundruðum þúsunda fruma í lítra. Fjöldi skorupþörungum var nokkuð jafndreifður um sniðið.

Helstu tegundir kísilþörungum sunnan til á sniðinu voru *Thalassiosira gravida* og *Chaetoceros furcellatus*, *Ch. decipiens* og *Ch. subsecundus*. Norðan við 69°N voru kísilþörungum meira áberandi í svifinu en dró úr fjölda smárra svifþörungum. Aðaltegund kísilþörungum var *Fragilariopsis oceanica* en aðrar helstu tegundir voru *F. cylindrus*, *Manguinea sp.*, *Pauliella teaniata* sem allar eru staflaga og mynda keðjur en einnig komu fyrir *Thalassiosira* tegundir sem mynda miðlægur frumur. Tegundir sem mynda miðlægur frumur voru því meira áberandi sunnan til á sniðinu en staflaga mun meira áberandi eftir því sem norðar dró auk þess sem fjöldinn varð mun meiri (15. mynd). Þær síðast töldu eru taldar norrænni (arktískari) tegundir (Tomas 1997).

Af skorupþörungum bar mest á ógreindum tegundum sem sennilega eru að stórum hluta ófrumbjarga en af frumbjarga tegundum má nefna *Prorocentrum balticum* sem kom fyrir á öllum stöðvum og fór fjöldi hans vaxandi frá suðri til norðurs. *Phaeocystis pouchetii* var langalgengastur af smáum svifþörungum sunnan til á sniðinu en norðar voru ógreindir smáir



16. mynd. Fjöldi fruma (frumur lítra⁻¹) af hverjum þörungahópi á 10 m dýpi á Langanessniði í maí 2006. (Smáir þörungar, Skorubörungar, Kísilþörungar).

Figure 16. Cell number (cells liter⁻¹) of phytoplankton groups in samples from 10 m depth at the transect Langanes to Jan Mayen in late May 2006 (Smáir þörungar = Flagellates and monads; Skorubörungar = Dinoflagellates; Kísilþörungar = Dia-

svifþörungar algengastir. *Coccolithus pelagicus* kom fyrir á öllum stöðvum en var mun algengari norðan til á sniðinu en sunnan til.

Talningar á bifdýrum sýndu að mun meira var af þeim á suðurhluta sniðsins (1000-3000 fr l⁻¹) en norðar (<1000 fr l⁻¹).

Í síðari hluta maí liggja einnig fyrir greiningar af 6 stöðvum á Langanessniði í 10 m dýpi (16. mynd). Heildarfjöldi svifþörungum var mestur syðst (stöð 231) og nyrst á sniðinu (stöð 212) þ.e. á landgrunninu við Langanes og Jan Mayen. Þar var bæði mest af smáum svifþörungum og kísilþörungum. Á öðrum stöðvum milli endastöðvanna var fjöldi kísilþörungum um helmingi minni en samt umtalsverður og fjöldi smárra svifþörungum var einnig talsverður. Styrkur kísils var orðinn lágur í Íslandshafi en var nokkru hærri á íslenska landgrunninu og við Jan Mayen. Gera má því ráð fyrir að vöxtur kísilþörungum í Íslandshafi hafi farið dvínandi í framhaldinu. Fjöldi skorubörungum var nokkuð jafn á sniðinu en þó minnstur næst Langanesi.

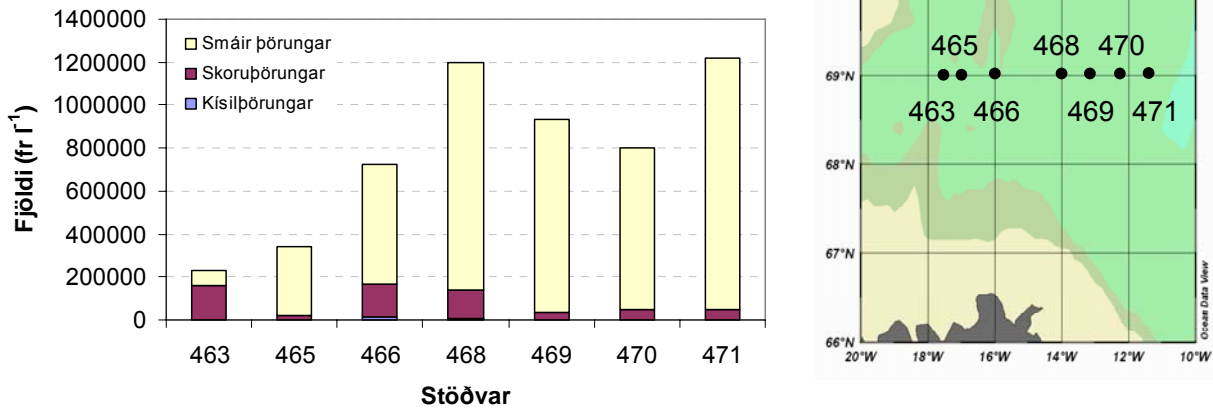
Helstu tegundir kísilþörungum næst Langanesi (stöð 231) voru *Thalassiosira gravida* og *Chaetoceros furcellatus*. Nokkrar af þeim síðar nefndu voru með dvalargró sem bendir til þess að farið sé að líða að lokum vaxtartíma þeirra. Á öllum öðrum stöðvum á sniðinu fundust staf-laga (pennate) kísilþörungar í langmestum mæli. Aðaltegund var *Fragilariopsis oceanica* en aðrar tegundir sem fundust voru *Fragilariopsis cylindrus*, *Manguinea sp.* og fleiri tegundir. *Thalassiosira* tegundir fundust norður eftir öllu sniðinu en í litlum mæli. Það má því

segja að samfélag kísilþörungum á Langanessniði litist mjög af arktískum tegundum, ef undan er skilið samfélag svifþörungum á stöð 231 næst Langanesi.

Í hópi skorubörungum bar mest á tegundum sem sennilega eru að mestum hluta ófrumbjarga. Tegundin *Prorocentrum balticum* sem er frumbjarga, fannst á öllum stöðvum í nokkrum mæli og einnig kalksvifþörungurinn *Coccolithus pelagicus*. Báðar þessar tegundir fundust í meira mæli norðan til á sniðinu en sunnar. Ógreindir smáir svifþörungar voru algengastir í hópi smárra svifþörungum (16. mynd) og í þeim hópi var nokkuð um *Phaeocystis pouchetii* syðst á sniðinu en ekkert norðar.

Talningar á bifdýrum sýndu að mestur fjöldi fannst á stöð 237 (3000 fr l⁻¹), helmingi minna á stöð 216 en fremur lítið á öðrum stöðvum (500 fr l⁻¹).

Í júlí liggja fyrir greiningar og talningar á svifþörungum af 7 stöðvum á 69°N sniði á 10 m dýpi (17. mynd). Varla er hægt að tala um kísilþörungum í þörungasvifinu svo lítið er af þeim. Undantekning er örilitill vottur sem finnst á stöð 466. Ríkjandi hópar voru smáir svifþörungar og skorubörungar. Skorubörungar voru meira áberandi vestan megin á sniðinu og upp á hrygginn en fjöldi þeirra dvínar eftir því sem austar dregur. Stór hluti þeirra voru ógreindir skorubörungar sennilega að miklum hluta ófrumbjarga. en mjög fáar frumbjarga tegundir fundust og í litlu magni. Fjöldi smárra svifþörungum fór vaxandi frá vestri til austurs og austan við hrygginn komu þeir fyrir í miklum



17. mynd. Fjöldi fruma (frumur lítra⁻¹) af hverjum þörungahópi á 10 m dýpi á 69°N sniði í júlí 2006. (Smáir þörungar, Skorubörungar, Kísilþörungar).

Figure 17. Cell number (cells liter⁻¹) of phytoplankton groups in samples from 10 m depth at 69°N transect in July 2006 (Smáir þörungar = Flagellates and monads; Skorubörungar = Dinoflagellates; Kísilþörungar = Diatoms).

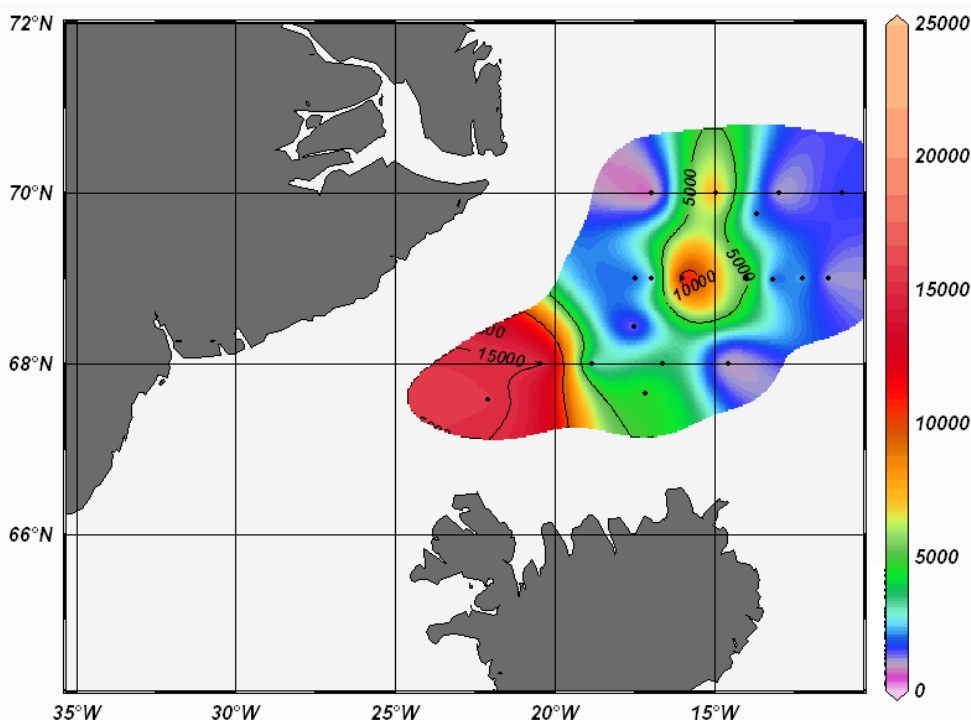
fjöldi (17. mynd). Langstærsti hluti þeirra voru ógreindir svifþörungar mjög smágerðir (< 5 µm). Hluti þessa hóps eru sennilega ófrumbjarga tegundir. Nokkuð bar á kalksvifþörungum, sérstaklega *Coccolithus pelagicus*, en fjöldi hans fór vaxandi frá vestri til austurs.

Á nokkrum þessara stöðva liggja fyrir talningar og greiningar úr 30 m dýpi. Niðurstöður þeirra eru mjög svipaðar og hér hefur verið rakið fyrir 10 m dýpi að því frátöldu að svoltið meira bar á kísilþörungum á vestustu stöðvunum, þar sem þeir ná til kísils á mörkum lagskiptingarinnar.

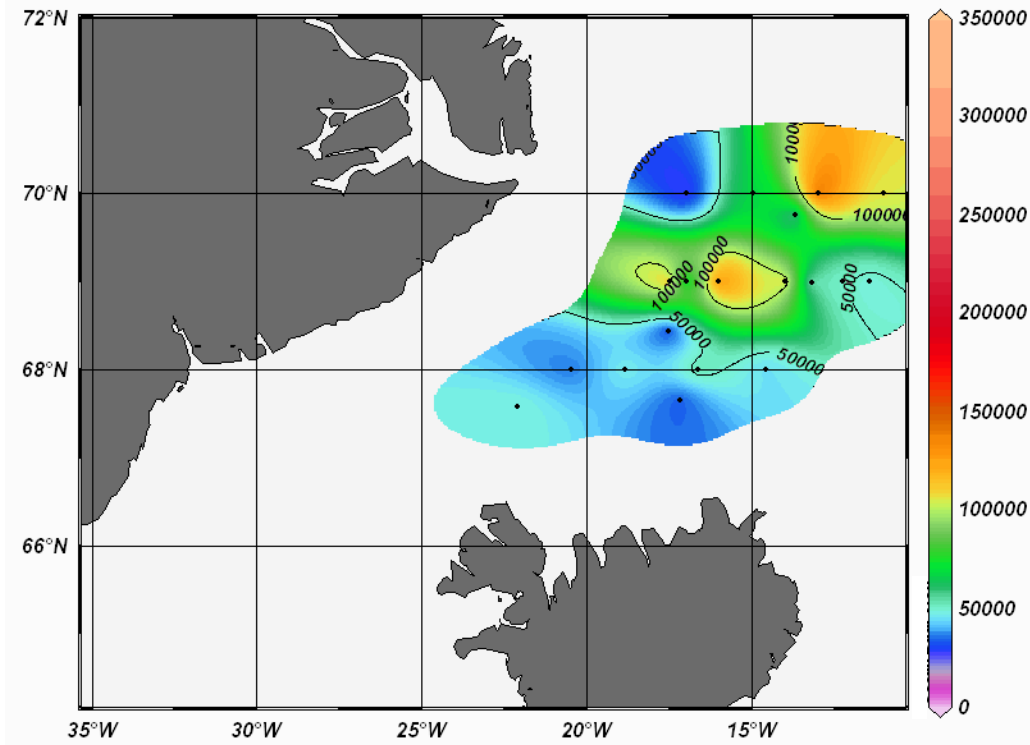
Talningar á bifdýrum sýna að mestur fjöldi þeirra fannst vestan og austan við Kolbein-

seyjarhrygginn (3000 fr l⁻¹) en fjöldinn var helmingi minni yfir hryggnum sjálfum og minnstur austast á sniðinu (800 fr l⁻¹).

Dreifing kísilþörungum í Íslandshafi á 10 m dýpi í júlí 2006 sýnir að mest var af þeim vestast á svæðinu á 68°N sniði og yfir Kolbeinseyjarhryggnum frá 69°N til 70°N (18. mynd). Sama á við um skorubörungum á 10 m dýpi, mest var einnig af þeim yfir Kolbeinseyjarhryggnum frá 69°N til 70°N (19. mynd). Mest var af smáum svifþörungum á 10 m dýpi í NA-verðu Íslandshafi austan við Kolbeinseyjarhrygginn (20. mynd) en á því svæði voru næringarefni (níturat og fosfat) enn að-



18. mynd. Dreifing kísilþörungum (frumur lítra⁻¹) á 10 m dýpi í Íslandshafi í júlí 2006.
Figure 18. Cell number (cells liter⁻¹) of Diatoms in samples from 10 m depth in the Iceland Sea in July 2006

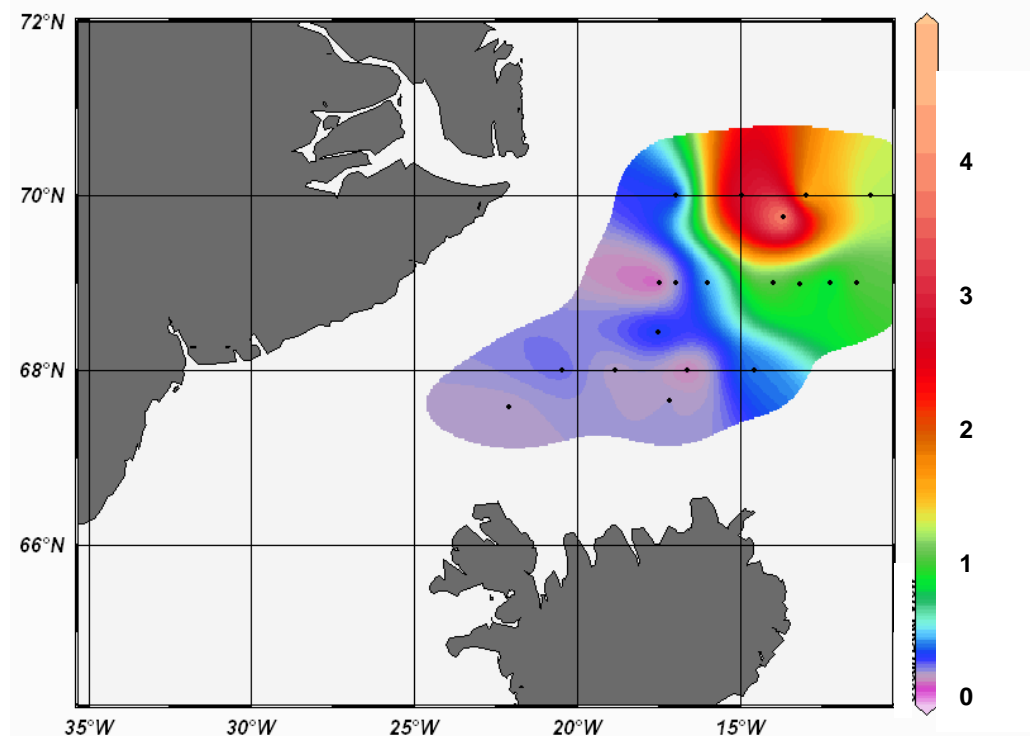


19. mynd. Dreifing skorupörunga (frumur lítra⁻¹) á 10 m dýpi í Íslands-hafi í júlí 2006.
Figure 19. Distribution of Dinoflagellates (cells liter⁻¹) in samples from 10 m depth in the Iceland Sea in July 2006.

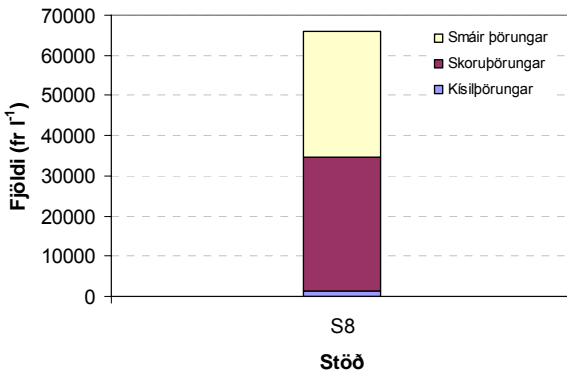
gengileg fyrir gróðurinn (Sólveig Ólafsdóttir 2012).

Þörungar voru greindir og taldir úr einu sýni frá nóvember 2006. Það sýni var tekið úr yfirborði á stöð 8 (68°N og 18°50'W) á Siglunesniði (21. mynd). Fleiri sýnum var ekki safnað í þessum tilgangi í leiðangrinum. Fjöldi kísilþörunga var lítill (1350 fr l⁻¹) en margar tegundir fundust í sýninu eða alls 19. Helstar

þeirra voru *Fragilariopsis oceanica*, *Skeletonema costatum* og nokkrar tegundir af ættkvíslunum *Chaetoceros* og *Thalassiosira*. Aðalhöparnir voru skorupörungar og smáir svifþörungar og var álika frumufjöldi í hvorum þeirra. Í fyrri hópnum voru ógreindir skorupörungar lang algengastir, sennilega að stórum hluta ófrumbjarga, en mjög lítið fannst af greinanlegum frumbjarga tegundum. Í seinni



20. mynd. Dreifing smárra svifþörunga (frumur lítra⁻¹) í 10 m dýpi í Íslandshafi í júlí 2006.
Figure 20. Distribution of small flagellates and monads (cells liter⁻¹) in samples from 10 m depth in the Iceland Sea in July 2006.



21. mynd. Fjöldi fruma (frumur lítra⁻¹) af hverjum þörungahópi á 0 m dýpi á Siglunessniði á stöð 8 (68°N-18° 50'W) í nóvember 2006. (Smáir þörungar, Skorupþörungar, Kísilþörungar).

Figure 21. Cell number (cells liter⁻¹) of phytoplankton groups in sample from 0 m depth at Sigluness transect (68°N-18° 50'W) in November 2006 (Smáir þörungar = Flagellates and monads; Skorupþörungar = Dinoflagellates; Kísilþörungar = Diatoms).

hópnum voru ógreindir frumbjarga smá-svifþörungur algengastir og nokkrar tegundir kalksvifþörungur komu einnig fyrir, þar á meðal *Coccolithus pelagicus* og *Emiliania huxleyi*. Fjöldi bifdýra var lítil (150 fr l⁻¹) sýninu.

Umræða

Í verkefninu Vistkerfi Íslandshafs hefur verið safnað miklum gögnum sem varða vistfræðilega þætti Íslandshafs. Þar má nefna gögn um sjófræði (hiti og selta), næringarefni, svifþörungur, átu og loðnu. Niðurstöður um lífmassa, samfélag og frumframleiðni svifþörungur liggja fyrir í Íslandshafi frá vetri til hausts árin 2006 til 2008. Þessar niðurstöður sýna að vaxtartími svifþörungur í Íslandshafi er hafinn í apríl. Á þeim tíma árs er styrkur blaðgrænu lágur enda er sjórinn enn uppblandaður og því er gróður jafndreifður mjög djúpt, jafnvel niður á 100 metra dýpi eða meira. Helst má vænta lagskiptingar á þessum árstíma þegar mikill pólsjór berst inn á svæðið og þegar hafís bráðnar og veldur seltulækkun í yfirborði og þar með lagskiptingu (Braarud 1935, Steemann-Nielsen 1935, Þórunn Þórðardóttir 1977b). Upphitun yfirborðslaga er hins vegar ekki hafin svo snemma árs. Í apríl 2007 má sjá byrjun slíkrar lagskiptingar vegna áhrifa pólsjár vestast á 69°N sniði (við 18°50'W) þar sem það mætir Siglunessniði. Í þessari veiku lagskiptingu var styrkur blaðgrænu meiri vorið 2007 en annars staðar á rannsóknasvæðinu á þeim tíma (2. mynd). Vorið 2008 bar ekkert á slíkri lagskiptingu enda náði útbreiðsla hafíss ekki eins langt til austurs það ár þannig að áhrifa hans gætti

ekki á þeim hluta 69°N sniðs sem rannsakaður var. Lagskipting vegna hafísbráðunar er alþekkt á norðlenska landgrunninu þegar hafís berst inn á svæðið og bráðnar (Hafsteinn G. Guðfinnsson 1977, Þórunn Þórðardóttir 1977b). Við slíkar aðstæður getur vöxtur svifþörungur orðið mjög hraður og magn þeirra mikið á stuttum tíma ef veðurfar er gott og lagskipting styrkist (Þórunn Þórðardóttir 1986). Vorhámark svifþörungur gengur þá yfir á tiltölulega skömmum tíma. Seinni hluta maímánuðar 2006 var vorhámarki náð um miðbik Íslandshafs (69° N) enda nokkur lagskipting á sniðinu m.a vegna hafísbráðunar en hafís náði austur að 19°V á þeim tíma. Kísilstyrkur var í lágmarki austan við Kolbeinseyjarhrygg niður á 30 til 50 m dýpi (Sólveig Ólafsdóttir 2012). Vöxtur kísilþörungur á þeim slóðum er því væntanlega í rénun það árið. Bent hefur verið á að stutt en snarpt vaxtarskeið svifþörungur við lagskiptar aðstæður geti myndað lífrænt efni sem sé fullkomlega sambærilegt að magni við framleiðni lífræns efnis sem á sér stað á lengri tíma á svæðum þar sem lagskipting er lítil (Þórunn Þórðardóttir 1977b). Athyglisvert er að magn blaðgrænu í Íslandshafi austan við Kolbeinseyjarhrygg er í kringum 2 mg m⁻³ í lok vorhámarks 2006 (4. mynd) þ.e. þegar kísill er uppurinn. Sennilegt er að styrkur blaðgrænu hafi verið eitthvað hærri í stuttan tíma í vorvextinum. Einnig er líklegt út frá þeim gögnum sem safnað hefur verið í þessu verkefni að vaxtartími kísilþörungur, sem eru uppistaðan í vorvexti svifþörungur, sé bæði stuttur og snarpur. Hitt er þó alkunna að vorblómi svifþörungur getur verið mjög breytilegur bæði hvað varðar tímasetningu og lengd og fer mjög eftir veðurfari og myndun lagskiptingar (Paasche 1960, Þórunn Þórðardóttir 1986). Niðurstöður þessara rannsókna úr Íslandshafi (Sólveig Ólafsdóttir 2012) og fyrri rannsókna (Unnsteinn Stefánsson & Jón Ólafsson 1991) hafa sýnt að styrkur kísils í lok vetrarblöndunar er almennt minni austan Kolbeinseyjarhryggs (4–5 μmól l⁻¹) en vestan hans (5–6 μmól l⁻¹). Þetta bendir til að framlag kísilþörungur til ársframleiðni svæðisins geti orðið meira vestan megin við hrygg en austan megin. Rétt er þó að taka fram að veðurfarslegir þættir geta breytt miklu um lagskiptingu og blöndun sjávar á vorin og þannig valdið tilfærslu næringarefna til yfirborðslaga lengra fram á sumar sem aftur getur viðhaldið vexti kísilþörungur lengur en ella.

Í lok vorvaxtar svifþörunganna er kísill uppurinn í Íslandshafi niður á 30 til 50 m dýpi. Sama gegnir ekki um önnur næringarefni (fosfat og nítrat). Samkvæmt mælingum í þessu verk efni eru enn tveir þriðju hlutar hámarksstyrks vetrarforða þessara næringarefna enn til staðar eftir að vorblómanum lýkur (Sólveig Ólafsdóttir 2012). Þessi forði næringarefna getur staðið undir dágóðum vexti svifþörunga annarra en kísilþörunga fram á sumar. Þetta kemur líka ágætlega fram í styrk blaðgrænu í austanverðu Íslandshafi í júlí 2006 sem er milli 1 og 2 mg m⁻³ (5. mynd) og bendir til að vöxtur svifþörunga standi yfir langt fram eftir sumri það ár. Til viðbótar er sennilegt að einhver endurnýjun næringarefna verði innan ljóstillífunarlagsins vegna líffræðilegra ferla sem umbreyta lífrænum köfnunar- og fosfórefnum í næringarefnasambönd sem svifþörungar geta nýtt sér til frekari vaxtar. Einnig er hugsanlegt að næringarefni berist í sumum árum í meira mæli en öðrum inn í austanvert Íslandshaf með atlantískum sjó sem leitar inn í hafið sunnan við Jan Mayen úr Noregshafi. Vestan við Kolbeins-eyjarhrygg voru næringarefni hins vegar uppurinn í júlí 2006 á því svæði sem komist var á vegna hafiss og gróður nauðalítill og lagskipting geysisterk. Það virðist því vera talsverður munur á svæðinu austan og vestan megin hryggjar í Íslandshafi hvað varðar næringarefnaskilyrði og gróðurmagn í sumum árum.

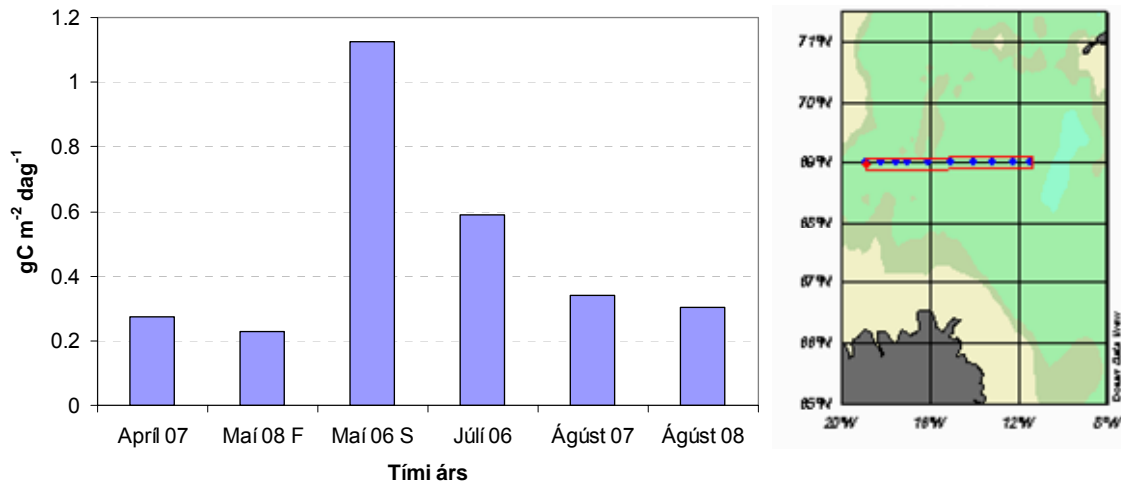
Í ágúst 2007 voru enn nokkur næringarefni til staðar í austanverðu Íslandshafi (Sólveig Ólafsdóttir 2012) en á sama tíma fannst lítill gróður á því svæði. Allmikið dýrasvif mældist samtímis á þessu slóðum og þar á meðal tegundir sem eru þekktar gróðurætur (Ástþór Gíslason & Teresa da Silva 2012). Því er ekki ósennilegt að dýrasvif hafi haldið gróðrinum niðri með beit jafnóðum og vöxtur hans fór fram. Slík beit gæti skýrt mjög lágan styrk blaðgrænu á þessum tíma þrátt fyrir að næringarefni væru til staðar. Önnur dæmi um lítinn gróður að sumri samfara nokkrum styrk næringarefna í Norður Atlantshafi og Norðursjó hafa einmitt verið útskýrð með beit dýrasvifs (Colebrook 1982, Dale o.fl. 1999).

Í ágúst 2008 voru öll næringarefni gengin til þurrðar í yfirborðslögum Íslandshafs bæði austan og vestan Kolbeins-eyjarhryggjar (Sólveig Ólafsdóttir 2012). Mjög sterk lagskipting var til staðar á öllu svæðinu niður á 20-40 m dýpi. Af þessum sökum fannst lítill sem enginn gróður á svæðinu nema allra vestast við

landgrunn Grænlands og þá aðeins á mörkum lagskiptingar á 20-40m dýpi, þar sem svifþörungar höfðu möguleika á að ná til næringarefna sér til vaxtar. Sterk lagskipting, lágur styrkur næringarefna og lítill gróður síðari hluta ágústmánaðar 2008 í Íslandshafi er mjög í samræmi við niðurstöður sem fengust í svokölluðum Greenland Sea Project-leiðöngnum sem voru farnir í vestanvert Íslandshaf í september árin 1987-1989 (Svend-Aage Malmberg 1991, Hafrannsóknastofnunin óbirt gögn).

Vexti svifþörunga í Íslandshafi má því skipta í nokkur gróðurtímabil frá vetri til hausts. Í byrjun árs (janúar til mars) er vetrarástand ríkjandi, síðan vorvöxtur frá apríl til maíbyrjunar þar sem dýpi blandaða lagsins er mikið, þá vorblómi þar sem komin er á lagskipting og næringarefni eru næg og vöxtur svifþörunga hraður, svo sum-arvöxtur með sterkri lagskiptingu þar sem blöndun við sjávarlög neðan lagskiptingar er ólíkleg og næringarefni ganga smám saman til þurrðar. Að lokum er takmarkaður haustvöxtur sem getur að hluta verið í sterkri lagskiptingu sem þó brotnar upp að lokum þegar vetrarblöndun hefst. Lítil gróðuraukning verður þó sennilega um haustið þar sem ljós er aftur orðið takmarkandi þáttur fyrir svifþörungana. Þessi framvinda virðist samsvara allvel því sem lýst hefur verið um vöxt svifþörunga t.d. í Norska hafinu (Dale o.fl. 1999, Rey 2004) og í Grænlandshafi (Schröder-Ritzrau o.fl. 2001).

Í fyrsta sinn hefur náðst að mæla frumframleiðni í Íslandshafi á nokkrum tímapunktum frá vori til hausts. Þess skal þó getið að mælingarnar eru ekki samfelldar á einu ári heldur dreifast á vaxartíma svifþörunga á þremur árum þ.e. 2006-2008. Samantekt á mælingum á öllum stöðvum á 69°N sniði frá 18°50'-11°27'V sýnir að seint í apríl til byrjun maí var frumframleiðni þegar hafin. Hún nær hámarki í maí en minnkar er líður á sumarið (22. mynd). Þessar niðurstöður eru í góðu samræmi við niðurstöður um dags frumframleiðni í Norska hafinu á svipuðum árstímum (Rey 2004). Í niðurstöðunum kemur vel fram að mikil frumframleiðni átti sér stað í austanverðu Íslandshafi í júlí 2006 þar sem gildin voru ríflega helmingur þess sem mældist í vorvextinum í maí. Einnig kemur fram að frumframleiðni var meiri í ágúst 2007, þegar næringarefni eru fyrir hendi, en í ágúst 2008 þegar styrkur næringarefna var mjög lítill (Sólveig Ólafsdóttir 2012). Í júlí 2006 og ágúst 2007 fór frumframleiðni vaxandi á 69°N



22. mynd. Meðaltal dagsfrumframleiðni ($\text{gC m}^{-2} \text{dag}^{-1}$) svifþörungum á fimm stöðvum á 69°N sniði ($18^\circ50-11^\circ27'\text{W}$) í Íslandshafi frá apríl til ágúst árin 2006 til 2008.

Figure 22. Average daily primary production ($\text{gC m}^{-2} \text{day}^{-1}$) of phytoplankton at five stations ($18^\circ50-11^\circ27'\text{W}$) on the 69°N transect in the Iceland Sea from April to August 2006 to 2008.

sniðinu frá vestri til austurs á samræmi við vaxandi styrk næringarefna. Frumframleiðni í ágúst var mest á 68°N sniði en fór minnkandi eftir því sem norðar dró. Í úttektum á frumframleiðni á íslenska hafsvæðinu hefur komið í ljós að frumframleiðni er þar mjög misjöfn (Þórunn Þórðardóttir 1977a, Kristinn Guðmundsson 1998) og einna minnst norðan og norðaustan íslenska landgrunnins. Frumframleiðni í Íslandshafi seinni hluta sumars virðist því vera svipuð og utan norðlenska landgrunnins og minnka eftir því sem norðar dregur samkvæmt niðurstöðum þessara rannsókna.

Sýnt hefur verið fram á fyrir norðlenska landgrunnið (að 68°N) að framleiðslugeta þess minnkar verulega þegar mikill pólsjór er á svæðinu (Þórunn Þórðardóttir 1994). Svipað gildir efalaust fyrir Íslandshaf þegar áhrif hafiss og pólsjár eru mikil. Við þær aðstæður er einsýnt að sterk lagskipting verður snemma sumars, næringarefni klárast eftir stuttan tíma og frumframleiðni verður lítil það sem eftir lifir sumars. Það ástand sem lýst hefur verið hér að ofan fyrir þetta verkefni á árunum 2006 til 2008 er því sennilega lýsandi fyrir þau hlýnunar áhrif sem birst hafa í Norður Atlantshafi á síðasta áratug og lýsir sér vel í útbreiðslu sjógerða á rannsóknasvæðinu (Héðinn Valdimarsson 2010 og 2012).

Talningar og greiningar á svifþörungum í sýnum frá febrúar og nóvember gáfu upplýsingar um samfélag svifþörungum um hávetur (febrúar) og í lok vaxartíma þeirra (nóvember) á 68°N . Þó að magn svifþörungum væri ekki mikið fundust allmargar tegundir í

báðum tilfellum af kísilþörungum, skorupörungum og smáum þörungum. Þetta staðfestir að svifþörungur eru á sveimi í yfirborðslögum sjávar norðan Íslands að vetrarlagi. Rannsókn sem gerð var í úthafinu suður- og suðaustur af Íslandi og í Norska hafinu sýndi einnig að fjölmargar tegundir og hópar svifþörungum finnast að vetri til á þessum slóðum í vatnsbolnum (Backhaus o.fl. 2003). Sambærilegar niðurstöður fengust einnig í annari rannsókn í Norska hafinu (Dale o.fl. 1999).

Í apríl voru smáir þörungur mjög áberandi í samfélagi svifþörungum en þeirra á meðal bar nokkuð á *Phaeocystis pouchetii* vestast á svæðinu. Kísilþörungur fóru vaxandi en innan kísilþörungum bar mest á smárri tegund stafлага kísilþörungum sem ekki reyndist unnt að greina til tegundar en var yfirgnæfandi í fjölda. Í rannsóknnum frá Norska hafinu (Dale o.fl. 1999, Rey 2004) hefur byrjun kísilþörungagróðurs gjarnan hafist með örum vexti smárra kísilþörungum-tegunda sem hafa verið yfir 80% af fjölda kísilþörungum og svipaðar niðurstöður hafa einnig fengist í rannsóknnum í Norður Atlantshafi (Sieracki o.fl. 1993, Taylor o.fl. 1993). Ekki er þó alltaf um sömu tegundir að ræða frá ári til árs. Helstu ástæður fyrir því að kísilþörungur ná ekki fullum blóma á þessum tíma er að lagskipting er lítil sem engin og dýpi blandaða lagsins mikið auk þess sem sum ár má búast við að beit geti haldið gróðri í skefjum (Dale o.fl. 1999). Ljós og næringarefni eru hins vegar í nægu magni. Kísilþörungur voru mjög áberandi í Íslandshafi í maí og fjöldi fruma talinn í hundruðum þúsunda í lítra. Algengar

tegundir í svifinu voru *Chaetoceros spp.*, *Thalassiosira spp.* sem eru mjög algengar í Norður Atlantshafi en til viðbótar bar allmikið á arktískari tegundum eins og *Fragilariopsis spp.* og *Pauliella taeniata*. *Phaeocystis pouchetii* fannst aðeins í miklum fjölda syðst og vestast á svæðinu einmitt þar sem áhrifa hafis gætti í yfirborðslögum sjávar vorið 2006. *P. pouchetii* hefur gjarnan verið talinn tengjast áhrifum hafiss og pólsjávar fyrir norðan Ísland (Hafsteinn G. Guðfinnsson 1977, Unnsteinn Stefánsson og Jón Ólafsson 1991, Þórunn Þórðardóttir 1994) þó ekki sé það einhlítt og á sumum svæðum er þekkt að tegundin blómstri stundum á undan kísilþörungum (Rey 2004). Nokkrar tegundir kísilþörungum eru einnig taldar tengjast áhrifum pólsjávar og hafiss fyrir norðan land svo sem *Fragilariopsis* og *Pauliella tegundir* (Hafsteinn G. Guðfinnsson 1977).

Smáir svifþörungur (<10µm) eru mjög mikilvægur hluti svifþörunganna í Íslandshafi á öllum gróðurtímanum en ekki síst þegar líður á sumarið. Svipaðar niðurstöður hafa komið í ljós Norska hafinu (Rey 2004), í Irmingerhafi (Hafsteinn G. Guðfinnsson o.fl. 2008) og í Barentshafi (Sakshaug o.fl. 2009) þó það síðast nefnda sé talsvert ólíkara hinum tveimur einkum hvað varðar dýpi. Talið er að hluti þeirra smáu svifþörungum sem finnast í þessum höfum séu ófrumbjarga en mjög erfitt er að greina marga þeirra til tegunda þar sem frumur þeirra aflagast oft við fixingu auk þess sem þeir missa gjarnan svipur en lögun fruma og fjöldi og gerð svipa eru oft mikilvæg greiningar-einkenni (Thronsen 1969, Rey 2004). Svipaða sögu er að segja um skorupörunga en hluti þeirra aflagast og missir svipur við fixingu. Þeir finnast í Íslandshafi í nokkrum mæli allt gróðurtímabilið og gegna mikilvægu hlutverki í svifþörungaflórunni. Innan þeirra finnast frumbjarga (autotrophic) og ófrumbjarga (heterotrophic) tegundir en sennilega einnig tegundir sem geta verið bæði frum- og ófrumbjarga (mixotrophic). Í Norska hafinu er talið fullvíst að allar þessar gerðir skorupörunga finnast og að þeir hafi mikilvægu hlutverki að gegna í svifsamfélaginu (Rey 2004).

Nokkrar tegundir kalksvifþörungum fundust í þessari rannsókn í Íslandshafi en flestar þeirra í litlu magni. Tegundin *Emiliania huxleyi* fannst í litlu magni í Íslandshafi að sumri til. Hún hefur einnig fundist í Grænlandshafi en er þó talin mun algengari í atlantískum sjó (Schröder-Ritzau o.fl. 2001, Rey 2004). Í ágúst 2008

myndaði hún geysimikinn flekk á norðlenska landgrunninu út og austur af Siglunesi. Hluti hans teygði sig norður með Kolbeinseyjarhrygg inn í sunnanvert Íslandshaf um tíma og gaf ágæta mynd af yfirborðstraumum á þessu svæði meðan flekkurinn sást á gervihnattamyndum (11. mynd, Hafsteinn G. Guðfinnsson o.fl. 2009). Þegar skoðaðar voru gervihnattamyndir af svæðinu síðustu vikur fyrir blómann var ljóst að hann hafði myndast fyrir norðan en ekki borist sem flekkur norður fyrir land. Slíkir blómar hafa hingað til oftast komið fyrst fram fyrir sunnan land eða vestan og síðan borist einstaka sinnum með straumum norður fyrir Vestfirði (Kristinn Guðmundsson og Agnes Eydal 2004). Þá eru blómar þessarar tegundar alþekktir í Norska hafinu (Rey 2004) við vesturströnd Noregs og alla leið norður í Barentshaf (Sagen and Dalpadado 2004, Sakshaug 2009). Þessi tegund hefur einnig fundist í Grænlandshafi og komið fram í setgildrum sem lagt var á þeim slóðum (Schröder-Ritzau o.fl. 2001).

Önnur tegund, *Coccolithus pelagicus*, fannst á öllum árstímum í Íslandshafi en þó aldrei í miklum mæli. Vitað er að þessi tegund hefur valdið blóma í Íslandshafi og hafa ummerki um það komið fram í setgildrum sem staðsettar voru í Austur-Íslandsstraumnum norðaustur af Langanesi (Jón Ólafsson pers. upplýsingar). Þó nokkrar aðrar tegundir kalksvifþörungum hafi einnig fundist í Íslandshafi þá komu þær fyrir í mun minna mæli en *E. huxleyi* og *C. pelagicus*. Svipaðar niðurstöður eru þekktar úr Norska hafinu (Rey 2004) og úr Grænlandshafi þar sem tvær fyrrnefndar tegundir eru lang algengustu tegundir kalksvifþörungum samkvæmt rannsóknum á sýnum úr setgildrum (Schröder-Ritzau o.fl. 2001).

Þakkir

Félögum mínum í verkefnisstjórn og öðrum sem hafa lagt hönd á plóginn færi ég bestu þakkir fyrir samstarfið. Ég þakka Agnesi Eydal og Kristínu Valsdóttur fyrir þátttöku við söfnun gagna á sjó, mælingar á blaðgrænu sýnum og talningar á svifþörungasýnum. Kristinn Guðmundsson fær bestu þakkir fyrir að gera útreikninga á frumframleiðni svifþörungum. Ég þakka Hildi K. Oddgeirsdóttur og Karli Gunnarssyni fyrir yfirlestur handrits og þeim síðarnefnda góðar ábendingar varðandi texta og myndir. Að lokum færi ég skipverjum á rannsóknaskipunum Árna Friðrikssyni og Bjarna Sæmundssyni þakkar fyrir samvinnu og

Heimildir

- Ástþór Gíslason & Teresa Silva 2012. Útbreiðsla og árstíðabreytingar dýrasvífs í Íslandshafi. *Hafrannsóknir* nr. 164: 67-87.
- Backhaus, J. O., Hegseth, E. N., Wehde, H., Irigoien, X., Hatten, K. & Logemann, K. 2003. Convection and primary production in winter. *Marine Ecology Progress Series* 251: 1-14.
- Braarud, T. 1935. The "Öst" Expedition to the Denmark strait 1929. II. The phytoplankton and its condition of growth. *Norske Vidensk. Akademiske Hvalråd. Skr.* nr.4.
- Buch, E. & Malmberg, S. Aa 1988. Greenland Sea Project. Internal Report No. 5.
- Colebrook, J. M. 1982. Continuous plankton records: Seasonal variations in the distribution and abundance of plankton in North Atlantic and the North Sea. *Journal of Plankton Research* 4: 435-462.
- Dale, T., Rey, F. & Heimdal, B. R. 1999. Seasonal development of phytoplankton at high latitude oceanic site. *Sarsia* 84: 419-435.
- Hafsteinn G. Guðfinnsson 1977. Rannsóknir á þörungasvífi á tveim stöðvum í sjónum norðan Íslands í maí-júní 1961-1974.. 4. árs verkefni við Háskóla Íslands 1977.
- Hafsteinn G. Guðfinnsson & Sólveig R. Ólafsdóttir and Ingibjörg Jónsdóttir 2009. Kalkþörungagaflekkur norðanlands í ágúst 2008/ Coccolithophorid bloom north of Iceland in August 2008. *Hafrannsóknir* nr. 145: 60-65.
- Hafsteinn G. Guðfinnsson, Hogni Debes, Tone Falkenhaus, Eilif Gaard, Ástþór Gíslason, Hildur Pétursdóttir, Þorsteinn Sigurðsson, Alexandra Stupnikova & Héðinn Valdimarsson 2008. Abundance and productivity of the pelagic ecosystem along a transect across the northern Mid Atlantic Ridge in June 2003. ICES CM 2008/C:13.
- Héðinn Valdimarsson 2010. Langtímabreytingar (Long term changes). Þættir úr vistfræði sjávar 2009 (Environmental conditions in Icelandic waters 2009). *Hafrannsóknir* nr. 152: 15-19.
- Héðinn Valdimarsson & Steingrímur Jónsson 2012. Ástand sjávar og straumar í Íslandshafi. *Hafrannsóknir* nr. 164: 14-29.
- Kristinn Guðmundsson 1998. Long-term variation in phytoplankton productivity during spring in Icelandic waters. *ICES Journal of Marine Science* 55: 635-643.
- Kristinn Guðmundsson & Kristín Valsdóttir 2004. Frumframleiðnimælingar á Hafrannsóknastofnuninni árin 1958-1999. Umfang, aðferðir og úrvinnsla. *Hafrannsóknastofnunin Fjölrit* nr. 107, 56 bls.
- Kristinn Guðmundsson & Agnes Eydal 2005. Blómi kalksviðþörungna í Norður-Atlantshafi. *Hafrannsóknastofnun Fjölrit* nr. 116: 33-36.
- Ólafur K. Pálsson, Héðinn Valdimarsson, Sólveig R. Ólafsdóttir, Hafsteinn G. Guðfinnsson, Ástþór Gíslason & Hjálmar Vilhjálmsson 2006. Vistfræðirannsóknir í Íslandshafi. Staða þekkingar. *Hafrannsóknastofnun, fjölrítuð skýrsla* í júní 2006.
- Ólafur K. Pálsson, Héðinn Valdimarsson, Sólveig R. Ólafsdóttir, Hafsteinn G. Guðfinnsson, Ástþór Gíslason, Hildur Pétursdóttir, Konráð Þórisson, Björn Gunnarsson, Sveinn Sveinbjörnsson, Agnar M. Þorsteinsson, Agnes Eydal, Björn Sigurðsson, Friðrik Guðmundsson, Jón Ingvar Jónsson, Kristín Valsdóttir, Magnús Danielsen, Ragnhildur Guðmundsdóttir, Stefán H. Brynjólfsson & Teresa Silva 2012. Vistkerfi Íslandshafs 2006-2008. Leiðangrar og gagnasöfnun. *Hafrannsóknir* nr. 164: 5-13.
- Paasche, E. 1960. Phytoplankton distribution in the Norwegian Sea in June 1954, related to hydrography and compared with primary production data. *Fiskeridirektoratets Skrifter, Serie Havundersøkelser* 12 (11): 51 bls.
- Rey, F. 2004. Phytoplankton: the grass of the sea. Í *The Norwegian Sea Ecosystem*. Ritstj. H. R. Skjoldal, Tapir Academic Press, Trondheim, bls. 97-136.
- Sagen, H. & Dalpadado, P. 2004. *Emiliana huxleyi* – oppblomstringen i Barentshavet sommeren 2003 observert ved hjelp av satellitt. *Fisken og Havet*, særnummer 2, 2004.
- Sakshaug E. (ed) 2009. Ecosystem Barents Sea. *Tapir Academic Press*, Trondheim 2009, 587 bls.
- Schäfer, P., Ritzrau, W., Schlüter, M., Thiede, J. (Eds) 2001. *The Northern North Atlantic. A Changing Environment*. Springer Verlag Heidelberg, 500 bls.
- Schröder-Ritzrau, A., Andruleit, H., Jensen, S., Samtleben, C., Schäfer, P., Matthiessen, J., Christian Hass, H., Kohly, A., & Thiede, J. 2001. Distribution, export and alteration of fossilizable plankton in the Nordic Seas. Í: *The Northern North Atlantic*. Ritstj. P. Schäfer, W. Ritzrau, M. Schlüter, J. Thiede, bls. 81-104.
- Sieracki, M. E., Verity, P. G. & Stoecker, D. K. 1993. Plankton community response to sequential silicate and nitrate depletion during the

- 1989 North Atlantic spring bloom. Deep-Sea Research II 40: 213-225.
- Sólveig R. Ólafsdóttir 2012. Svæðatengdur styrkur og nýting næringarefna í Íslandshafi. *Hafrannsóknir nr.* 164: 30-44.
- Steemann-Nielsen, E. 1935. The production of phytoplankton at the Faroe Isles, Iceland, East Greenland and the waters around. *Medd. fra Kom. for Danm. Fiskeri- og Havundersøkelser*. Plankton. Bind III. Nr, 1.
- Strickland, J. D. H. & Parsons, T. R. 1972. A practical handbook of seawater analysis. Fisheries Research Board of Canada 167(1): 310 bls.
- Sven Aage Malmberg (ed) 1991. Greenland Sea Project 1987-1991 by the Bjarni Sæmundsson GSP Group. ICES CM 1991/C:36 session R, 22 bls.
- Taylor A. H., Harbour, D. S., Burkhill, P. H. & Edwards, E. S. 1993. Seasonal succession in the pelagic ecosystem of the North Atlantic and the utilization of nitrogen. *Journal of Plankton Research* 15: 875-891.
- Tomas, C. (ed) 1997. Identifying Marine Phytoplankton. Academic Press, 858 bls.
- Thronsen, J. 1969. Flagellates of Norwegian Coastal Waters. *Nytt Magasin for Botanikk*, 16(3-4): 161-216.
- Thronsen, J., Hasle, G. R. & Tangen, K. 2003. Norsk kystplankton flora. Almatel Forlag AS, 341 bls.
- Unnsteinn Stefánsson & Jón Ólafsson 1991. Nutrients and fertility of Icelandic waters. *Rit Fiskideildar* 12(3): 1-56.
- Utermöhl, H. 1931. Neue Wege in der quantitative Erfassung des Planktons. *Verh. Intern. Verein. theor. angew. Limnol.* 5: 567-596.
- Þórunn Þórðardóttir 1977a. Framleiðni þörungasvifsins í sjónum við Ísland. *Rit Landverndar* nr.5: 33-42
- Þórunn Þórðardóttir 1977b. Primary production in North Icelandic Waters in relation to recent climatic changes. Í *Polar Oceans*. Proceedings of the polar oceans conference held at McGill University, Montreal, May 1974. Ritstj. M. J. Dunbar. Arctic Institute of America, Canada, s. 655-665.
- Þórunn Þórðardóttir 1984. Primary production north of Iceland in relation to water masses in May-June 1970-1980. ICES CM 1984/L:20, 17 bls.
- Þórunn Þórðardóttir 1986. Timing and duration of spring bloom in south and southwest of Iceland. Í: *NATO ASI Series G7: The role of freshwater outflow in coastal marine ecosystem*. Ed. S Skreslet. Springer Verlag Berlin Heidelberg.
- Þórunn Þórðardóttir 1994. Plöntusvif og framleiðni í sjónum við Ísland. Í *Íslendingar, hafid og auðlindir þess*. Ritstj. Unnsteinn Stefánsson. Vísindafélag Íslendinga. Ráðstefnurit IV, s. 65-88.

Útbreiðsla og árstíðabreytingar dýrasvifs í Íslandshafi

Ástþór Gíslason og Teresa Silva

Hafrannsóknastofnunin

Ágrip

Ástþór Gíslason og Teresa Silva 2012. Útbreiðsla og árstíðabreytingar dýrasvifs í Íslandshafi. Hafrannsóknir nr. 164. Magn, tegundasamsetning og árstíðabreytingar dýrasvifs í Íslandshafi, hefðbundinni fæðuslóð loðnunnar, var rannsakað í tengslum við umhverfispætti og svifþörung. Gögnum var safnað í rannsóknaleiðngum sem farnir voru árin 2006 til 2008 og var sýnum ýmist safnað úr yfirborðslögum eða úr öllum vatnsbolnum. Miklar sveiflur voru í magni og tegundasamsetningu dýrasvifs, bæði innan árs og milli ára. Að vetrinum (nóvember - febrúar) hélt milliátan (e. mesozooplankton) sig aðallega í dýpri lögum sjávar (~200-1000 m) við mjög lágan hita (~0°C), var komin upp í yfirborðslögin í maí (~0-100 m) þar sem hún hélt sig þar til í ágúst, en eftir það fóru stofnarnir að færa sig aftur á vetursetudýpi neðar í vatnsbolnum. Tegundafjölbreytni milliátu var breytileg, yfirleitt hæst við landgrunnssbrúnirnar norður af Íslandi og austur af Grænlandi, en lægst í miðju Íslandshafi. Krabbaflær voru >90% af allri milliátu. Sex krabbaflóategundir mynduðu saman ~92% af öllum krabbaflóm miðað við fjölda en ~95% miðað við lífmassa. Tvær stórátutegundir (e. macrozooplankton) reyndust >80% af allri stórátu miðað við fjölda. Áhrif umhverfispáttá á samfélagsgerð dýrasvifs var kannað með RDA-greiningu. Skýribreyturnar selta, árið 2008, botndýpi, hitastig og blaðgræna skýrðu um 29% af heildarbreytileika í samfélagsgerð milliátu. Greiningin leiddi í ljós þrjár megin-samfélagsgerðir eða hópa. Atlantískt samfélag austarlega þar sem rauðáta (*Calanus finmarchicus*), *Pseudocalanus*, pílormar og götugar voru tiltölulega algengir, norrænt („arktískt“) samfélag norðvestarlega þar sem póláta (*C. hyperboreus*), ísáta (*C. glacialis*), *Microcalanus* spp. og *Oncaea* spp. voru algengar, og samfélag með tengsl við landgrunnssvæðin sunnarlega þar sem mikið var af *Temora longicornis*, *Acartia* spp., *Podon leuckarti* og lirfum botndýra, og sem var sérstaklega áberandi árið 2008. Útbreiðsla marflóa og ljósátu tengdist einkum blaðgrænu en einnig seltu. Í heild má segja að tegundasamsetning og samfélagsgerð dýrasvifs í Íslandshafi beri þess merki að inn á svæðið streymir sjór frá ólíkum hafsvæðum, sem ber með sér átu af ólíkum uppruna, hlýr sjór úr suðri og austri með atlantískum tegundum en kaldur sjór úr norðri með norrænum tegundum. Mikilvægustu átutegundirnar eru rauðáta, póláta, marflóin *Themisto abyssorum* og ljósátan sporðkríli (*Thysanoessa longicaudata*).

Abstract

Astthor Gíslason and Teresa Silva 2012. Abundance, composition and development of zooplankton in the subarctic Iceland Sea. Marine Research in Iceland no. 164. The abundance, composition and development of zooplankton in the subarctic Iceland Sea was studied in relation to hydrographic features and phytoplankton growth during summer in three years (2006-2008), as based on large scale sampling from surface waters (0-50 m) and depth stratified sampling from the whole water column at selected sites. The region historically serves as the main nursery and feeding grounds of the Icelandic capelin stock. The results show marked differences in abundance and composition of the plankton community both seasonally within the year and between years. Zooplankton was mostly confined to the deeper layers during the winter (~200-1000) at low temperatures (~0°C) and had ascended to the surface layers by May (~0-100 m). The zooplankton stayed in the surface layers until August, thereafter animals returned to deeper layers. Mesozooplankton diversity in late summer (July/August) was highly variable but tended to be highest near the shelf edges east of Greenland and north of Iceland and lowest in the central Iceland Sea. Copepods made up >90% of the mesozooplankton. Among the copepods, six species made up approximately 92% of copepod numbers and ~95% of copepod biomass. Two macrozooplankton species made up >80% of total macrozooplankton numbers. Relations between the mesozooplankton community and environmental parameters in late summer were established using redundancy analysis (RDA). In total, 29% of mesozooplankton variability was explained by five variables (salinity, year 2008, bottom depth, temperature and chlorophyll a). Three main zooplankton communities were identified; 1) an Atlantic community in the eastern region with *Calanus finmarchicus*, *Pseudocalanus* spp., Chaetognaths and foraminiferans as most abundant, 2) an Arctic community at relatively high latitudes and longitudes with relatively high numbers of *C. hyperboreus*, *C. glacialis*, *Microcalanus* spp. and *Oncaea* spp., and 3) a community with coastal affinities at lower latitudes with relatively high numbers of e.g. *Temora longicornis*, *Acartia* spp., *Podon leuckarti* and larvae of benthic animals. It is noteworthy that species belonging to this groups were particularly abundant in 2008. The distribution pattern of macrozooplankton was found by the RDA analysis to be

related to that of chlorophyll a biomass and salinity. In general, the zooplankton community in the Iceland Sea was characterized by a mixture of Arctic and Atlantic associated species, reflecting that the region is a meeting place of Arctic and Atlantic species, with the copepods *C. finmarchicus* and *C. hyperboreus*, the amphipod *Themisto abyssorum* and the euphausiid *Thysanoessa longicaudata* as key players.

Inngangur

Hafsvæðið djúpt norður af Íslandi (Íslandshaf) gegnir þýðingarmiklu hlutverki fyrir fiskveiðar okkar Íslendinga, því að mikilvægar fæðuslóðir loðnu eru á þessu svæði (Hjálmar Vilhjálmsson 1994, 2002, Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1997a, Ólafur K. Pálsson o.fl. 2012), en loðnan er sem kunnugt er mikilvægur nytjafiskur og einnig mikilvæg fæða fyrir verðmætasta nytjastofn okkar Íslendinga, þorskin. Í fæðukeðjum sjávar er dýrasvifið, eða átan eins og sjómenn oftast kalla það, mikilægur hlekkur, þar sem um það flyst frumframleiðni svifþörunganna til efri fæðuprepa. Rannsóknir sem miða að því að auka þekkingu okkar á lífsferlum, árstíðabreytingum og útbreiðslu dýrasvifsins og þeim þáttum sem hafa áhrif á vöxt þess og viðgang á fæðuslóð loðnunnar eru því mikilvægar.

Rannsóknir á dýrasvifi á djúpslóð norður af landinu, í hinu eiginlega Íslandshafi, eru mjög fáar. Árni Friðriksson hóf kerfisbundnar athuganir á átu á norðurmiðum með rannsóknnum á tengslum átu og síldar fyrir norðan land á fjórða áratugnum, en rannsóknir hans voru einkum bundnar við landgrunns-svæðin (Árni Friðriksson 1944). Áður höfðu Danir að vísu stundað hér áturannsóknir um og upp úr þarsíðustu aldamótum, þ. á. m. úti fyrir Norðurlandi, en þær rannsóknir beindust aðallega að því að skrá fundarstaði tegunda (Paulsen 1906, With 1915, Jespersen 1940a, b).

Rannsóknir á átu í því augnamiði að fylgjast með langtímabreytingum í átumagni hafa verið stundaðar út af Norðurlandi frá árinu 1960, en þær eru að mestu einskorðaðar við landgrunns-svæðin. Auk upplýsinga um langtímabreytingar átu og tengslum þeirra við umhverfis- og veðurfarsþætti (Ólafur S. Ástþórsson o.fl. 1983, Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1995), hafa þessar rannsóknir og gefið mikilsverðar upplýsingar um útbreiðslu svifdýra við landið í tengslum við sjógerðir (Ástþór Gíslason & Ólafur S. Ástþórsson 2004, Ástþór Gíslason o.fl. 2009).

Rannsóknir á útbreiðslu svifdýra voru liður í fimm ára alþjóðlegu hafrannsóknáttaki í Íslandshafi (Greenland Sea Project, GSP) sem stóð árin 1987-1991. Hvað varðar átuþáttinn takmörkuðust rannsóknirnar þó að mestu við jaðarsvæði Íslandshafs, nefnilega við tvö snið, annað frá Scoresbysundi til Jan Mayen en hitt þvert yfir Grænlandssund (Ólafur S. Ástþórsson o.fl. 1995).

Á tíunda áratug síðustu aldar voru árstíðabreytingar dýrasvifs fyrir Norður- og Norðausturlandi rannsakaðar í tveimur heilsárs-rannsóknnum. Fyrri rannsóknin var gerð á Siglu-nessniði árin 1993-94 (Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1997b, Ástþór Gíslason & Ólafur S. Ástþórsson 1998), en sú síðari á Langanessniði árin 1995-96 (Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 2003). Þótt þessar athuganir hafi ekki náð yfir nema lítinn hluta af hinu eiginlega Íslandshafi, þá hafa þær engu að síður gefið mikilsverðar upplýsingar um líf- og vistfræði lykiltegunda á landgrunninu og við landgrunnsbrúnina norðan og norðaustan Íslands, allt norður að 68°N.

Markmið þeirra rannsókna, sem hér verður greint frá, er að lýsa útbreiðslu og árstíðabreytingum dýrasvifsins í Íslandshafi og tengja þær breytingum á sjófræðilegum þáttum og svifþörungum. Athuganirnar voru liður í vistfræðirannsóknnum í Íslandshafi í tengslum við göngur loðnunnar sem fram fóru á vegum Haf-rannsóknastofnunarinnar árin 2006–2008.

Aðferðir

Til að sinna þessum rannsóknnum voru farnir leiðangrar á ýmsum árstímum árin 2006, 2007 og 2008 (Tafla 1). Í leiðöngrunum voru gerðar athuganir og sýnum safnað á fjölmörgum rannsóknastöðvum (Ólafur K. Pálsson o.fl. 2012). Á flestum rannsóknastöðvum var notuð sonda til að mæla sjávarhita og seltu og sjó-sýnum safnað til mælinga á blaðgrænu. Dýrasvifi var safnað á flestum stöðvum og sýnin ýmist unnin upp m.t.t. þurrvigtar eða tegunda-samsetningar (sjá neðar) (Tafla 1).

Átunni var safnað á þrennan hátt (Tafla 2). Á flestum rannsóknastöðvum voru tekin sýni með WP2-háfum sem dregin voru frá 50 m dýpi og lóðrétt upp að yfirborði. Á fjórum stöðvum (1. mynd) var auk þess notaður svonefndur Multi-net-fjólmeta-háfur til að safna átu úr öllum vatnsbolnum. Hann er með fimm netum og er dreginn á leiðandi kapli, þannig að hægt er að stjórna frá skipinu hvar háfar opnast og lokast

Tafla 1. Yfirlit yfir fjölda sýna eftir leiðongrum og háfagerðum sem unnin voru upp í tengslum við þessa rannsókn, Þ: þurrvigta-sýni, T: talningasýni.

Table 1. Number of samples analysed for dry weight (P) and species composition (T) for this study by cruises and gear type.

Ár	Árstími	Leiðangur	WP2		Multinet		Tucker	
			Þ	T	Þ	T	Þ	T
2006	17.-30. júl	bs062006	139	-	-	54	-	-
	21.-26. nóv	af112006	-	-	-	18	-	-
2007	12.-14. feb	bs032007	-	-	-	35	-	-
	19.-27. maí	bs082007	-	-	-	18	-	-
	11.-26. ágú	bs112007	71	19	-	37	-	12
2008	1.-5. maí	bs062008	-	-	-	37	-	-
	12.-31. ágú	af112008	86	29	-	-	-	14
Alls			296	48	-	199	-	26

og afla dýpisskiptra sýna úr öllum vatnsbolnum. Við söfnunina var háfnum yfirleitt slakað því sem næst niður að botni (~50 m frá botni) og hann síðan dreginn hægt upp að yfirborði aftur. Söfnunin var stöðluð, þannig að leitast var við að ná sýnum úr sömu dýpissbilum á öllum stöðvum (Tafla 2). Þar sem dýpið var mest náðust þannig 10 sýni en færri grynna. Til að ná öllum þessum sýnum þurfti að slaka háfnum tvisvar til þrisvar sinnum eftir dýpi. Leitast var við að hafa hífingarhraða í WP2 og Multinet-togunum ~0,5 m sek⁻¹. Árin 2007 og 2008 var að auki svonefndur Tucker-háfur nýttur til söfnunar. Honum var slakað niður á 100 m dýpi (einu sinni niður á 200 m) og hann síðan hífður aftur upp að yfirborði á meðan skipið sigldi á eins til tveggja hnúta ferð. Sýnum sem safnað var með WP2- og Multinet-háfum eru ekki samþæringleg þeim sem safnað var með Tucker-háfi, bæði vegna þess að möskvastærðin var ólík, en einnig vegna þess að þeim var beitt á mismunandi hátt við söfnun (WP2- og Multinet-háfarnir voru dregnir lóðrétt, en Tucker-

háfurinn á eftir skipi á ferð), þannig að sá síðar-nefndi safnar betur öflugum sunddýrum sem geta forðast WP2 og Multinet-háfana (Tafla 2). WP2- og Multinet-háfar henta því til að safna tiltölulega smáum svifdýrum, svokallaðri milli-átu (e. mesozooplankton), en Tucker-háfar til að safna stærri svifdýrum, stóratu (e. macrozooplankton), svo sem ljósátu og marflóm. Til að mæla rúmmál sjávar sem fór í gegnum háfana voru notaðir flæðismælur sem komið var fyrir í miðjum söfnunaropunum. Í örfáum tilvikum biluðu flæðismælarnir og var þá rúmmálið áætlað út frá tog lengd og flatarmáli háfanna. Í WP2- og Tucker-togum var dýpið mælt með Scanmar dýpismæli sem festur var á togvírinn rétt fyrir ofan söfnunaropið, en í Multinet-togum var notaður dýpismæli sem er sambyggður háfnum.

Í rannsóknastofu um borð var sýnunum yfirleitt skipt í tvennt með Motoda-skiptara (Motoda 1959). Annar helmingurinn var settur í 4% formalínlausn sem hlutleyst var með boraxi, en hinn var frystur (-18°C). Þegar komið var í

Tafla 2. Yfirlit yfir eiginleika háfana sem notaðir voru í rannsóknunum (flatarmál söfnunarops og möskvastærð), hvernig þeim var beitt og úr hvaða dýpum var safnað.

Table 2. Overview of zooplankton net specifications (opening area, mesh size), towing mode and depth layers sampled.

Háfagerð	Flatarmál söfnunarops (m ²)	Möskvastærð (µm)	Hvernig togað	Söfnunardýpi (m)
WP2	0,25	200	Lóðrétt tog	0-50
Multinet	0,25	200	Lóðrétt tog	0-50-100-200-300-400-600-800-1000-1400-1800
Tucker	4,00	1000	U-tog	0-100* (0-200 á einni stöð)

land voru valin formalínsýni greind til tegunda og þroskastiga og talin undir víðsjá. Ljósáta og marflær voru yfirleitt taldar úr heilum sýnum, en flestar aðrar tegundir og hópar voru taldar úr hlutsýnum – yfirleitt voru þá talin og tegunda-greind ~500 dýr – en fáein sýni voru það lítil að unnt var að telja þau að fullu. Við skiptingu þessara sýna var einnig notaður Motoda skiptari (Motoda 1959). Frystisýnin voru notuð til að mæla lífmassa (þurrvig). Sýnin voru þá þurrkuð í þurrskáp við ~70°C í 20 tíma og síðan vegin (Båmstedt 1974). Fáein sýni voru enn rök eftir þennan tíma og þurfti því að þurrka lengur.

Lífmassi krabbaflóa í sýnunum var áætlaður út frá fjölda þeirra og birtum heimildum um þyngd einstaklinga (Davis 1984, Norrbin o.fl. 1990, Tande 1991, Longhurst & Williams 1992, Richter 1994, Auel 1999, Hirche & Kosobokova 2003).

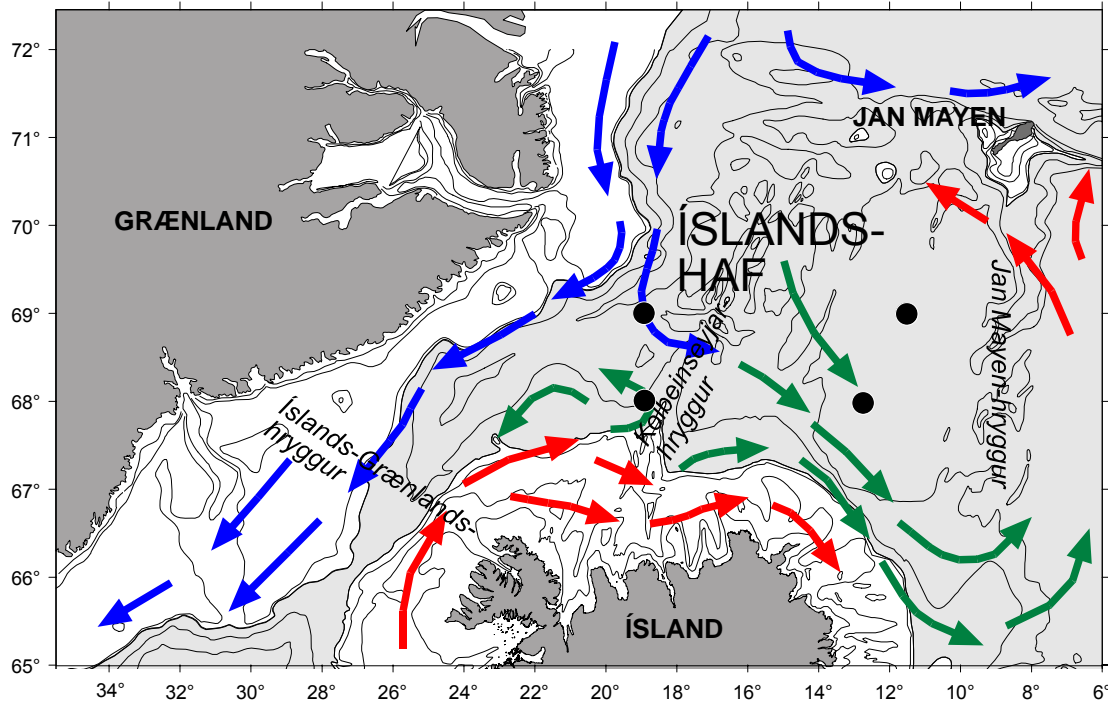
Það skal tekið fram, að til að kanna árstíða-breytingar átunnar verða sýni sem safnað var á mismunandi árstímum borin saman eins og um eitt ár væri að ræða, enda þótt þeim hafi verið safnað á þremur árum og ekki í réttri tímaröð, nefnilega í febrúar 2007, fyrri (2008) og seinni (2007) hluta maí, júlí 2006, ágúst 2008 og nóvember 2006 (Tafla 1). Æskilegast hefði að sjálfsgöðu verið að hafa gögnin í réttri tímaröð, en af ýmsum ástæðum var það ekki framkvæmanlegt. Jafnvel þótt sýnunum hafi ekki verið safnað í réttri tímaröð, teljum við að með því að greina þau eins og við gerum eftir mánuðum, sé engu að síður hægt að gera sér grein fyrir meginlínunum í ársferlum dýrasvifs og hvernig þeir tengjast breytilegum umhverfisþáttum.

Til að kanna tegundafjölbreytni í júlí og ágúst var reiknaður út svokallaður Shannon-Wiener fjölbreytileikastuðull (Krebs 1989) og til að kanna tengsl umhverfisþátta og samfélagsgerðar dýrasvifs var beitt fjölþátta hnitunargreiningum (e. ordination). Hnitunargreining er aðferð til að meta tengsl tegunda í líffélagi með því að raða sýnum og tegundum í hnitakerfi þannig að tengslin á milli þeirra verði ljós. Ásarnir í hnitakerfinu, hnitunarárnir, eru þannig gerðir að þeir skýri sem mest af breytileikanum í samfélagsgerðinni. Greiningin stefnir að því að sýna tengslin í sem fæstum víddum (með sem fæstum hnitunarásum) - ás 1 skýrir mestan breytileika, ás 2 næstmestan o.s.frv. - og draga þannig fram þau vensl sem eru mikilvægust. Hér verður beitt svonefndri RDA-greiningu (e. redundancy analysis), sem er

þvinguð hnitunargreining (e. direct ordination) en þá eru valdar umhverfisbreytur látnar hafa áhrif á legu hnitunarásanna sem áður voru nefndir, og einnig reiknað út hversu mikinn breytileika viðkomandi breytur skýra. Í upphafi var beitt svonefndri DCA-greiningu (e. detrended correspondence analysis) til að kanna hvort vensl umhverfisþátta og þéttleika tegunda væru línuleg eða „unimodal“. DCA-greiningin leiddi í ljós að flestar tegundir höfðu línuleg tengsl við umhverfisþættina og því var RDA-greiningu beitt á gögnin (ter Braak og Smilauer 2002).

Gerðar voru tvær RDA greiningar, annars vegar á milliáttu úr yfirborðslögum (WP2- og Multinet-sýni úr 0–50 m), og hins vegar á stór-áttu (Tucker-sýni úr 0–100 m). Í greiningunni voru hitastig og selta (meðaltöl frá 0–50 m dýpum (WP2- og Multinet-sýnin) eða 0–100 m dýpum (Tucker-sýnin)), blaðgræna (heildað fyrir efstu 30 m sjávar, mg m⁻²), botndýpi og ár notuð sem skýribreytur (e. explanatory variables) en dagsetning (dagnúmer innan árs) sem fylgibreyta (e. covariable). Það að nota dagsetningu á þennan hátt sem fylgibreytu tekur burt breytileika sem kann að vera í gögnunum vegna þess að sýnin voru ekki tekin á sama árstíma (í júlí 2006, en ágúst 2007 og 2008). Skýribreyturnar voru staðlaðar miðað við að meðaltal verði 0 og fervik 1, og fjöldatölur miðað við meðaltal 0 til að sjaldgæfar tegundir fái ekki of mikið vægi (ter Braak & Smilauer 2002). Skýribreyturnar voru allar notaðar sem samfelldar breytur (e. continuous variable), nema ár sem var sett inn í greininguna sem flokkunarbreyta (e. categorical variable). Fyrir greiningu var fjöldatölum umbreytt miðað við $\ln(x+1)$. Svonefnt Monte-Carlo endurröðunarpróf með 499 umröðunum (e. Monte-Carlo permutation test with 499 permutations, ter Braak og Smilauer 2002) var notað til að fá upplýsingar um hvaða umhverfisþættir væru marktækir sem skýribreytur. Greiningin raðar skýribreytunum eftir mikilvægi (e. forward selection) og eru einungis þær breytur teknar með sem hafa marktæk áhrif á röðunin (Monte Carlo próf, 499 umraðanir, $p < 0.05$). Fjölþátta-greiningin var gerð í forritinu CANOCO 4.5 (ter Braak & Smilauer 2002).

Varðandi túlkun hnitunarmynda er það að segja, að því nær sem tegundir eru hver annarri á myndunum því líkari kröfur hafa þær til umhverfisins (ter Braak & Verdonschot 1995, ter Braak & Smilauer 2002). Á sama hátt er það



1. mynd. Einfölduð mynd af yfirborðsstraumum í Íslandshafi. Rauður litur: tiltölulega hlýr og saltur Atlantssjór; blár litur: kaldur seltulífill pólsjór; grænn litur: svalsjór eða blöndunarsjór Atlants- og pólsjárvar. Einnig er sýnd lega stöðvanna þar sem Multinet-háfur var nýttur til að safna átu úr öllum vatnsbolnum á mismunandi árstímum. (Straumamynd byggð á Unnsteini Stefánssyni og Jóni Ólafssyni 1991, Héðni Valdimarssyni og Svend Aage Malmberg 1999, Österhus og Gammelsröd 1999, Olsson o.fl. 2005, Mork og Blindheim 2007).

Figure 1. Map of the study area showing schematically the main ocean currents in the upper layers. Red arrows: Atlantic Water, blue arrows: Polar Water, green arrows: mixed water. Stations where Multinet was used to sample from the whole water column are also shown. (Currents modified from Stefánsson and Ólafsson 1991, Valdimarsson and Malmberg 1999, Österhus and Gammelsröd 1999, Olsson o.fl. 2005, Mork og Blindheim 2007).

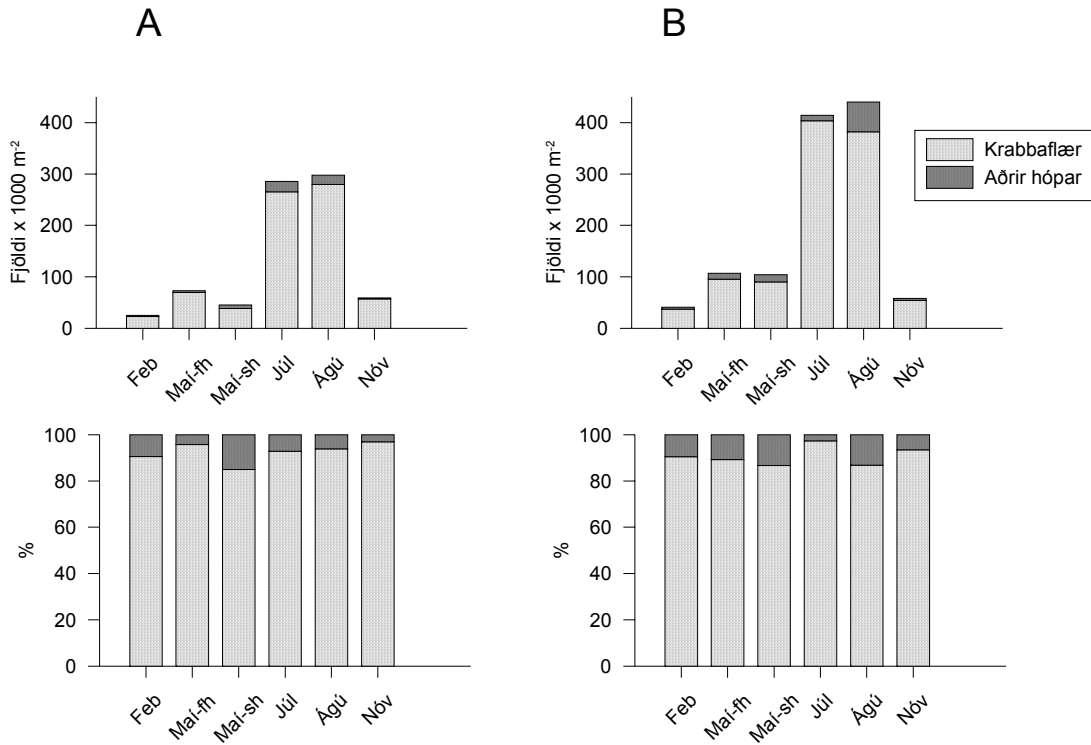
svo, að því nær sem sýni eru hvert öðru á hnitunargrafi því líkari eru þau um tegundasamsetningu. Örvarnar gefa til kynna í hvaða átt viðkomandi tegund eða skýribreyta er að aukast og lengd þeirra táknar hversu mikill breytileikinn er. Þær tegundir og sýni sem eru nálægt miðju grafsins sýna lítil tengsl við hnitunarársanna og þær eru því yfirleitt ekki sýndar, þó öll sýni séu að sjálfsögðu með í greiningunni. Eins og áður sagði eru bæði skýribreytur og fjöldatölur staðlaðar þannig að meðaltal verði 0, en af því leiðir að meðaltalið er í núllpunkti. Hornin á milli örva fyrir tegundir eða umhverfisbreytur gefa til kynna fylgni þeirra, þau eru ekki fylgin ef örvarnar eru hornrétt hver á aðra, en fylgin (jákvætt eða neikvætt) ef hornið er lítið eða stórt. Langar örvar fyrir skýribreytur gefa til kynna að fylgnin sé mikil á milli viðkomandi skýribreytu og tegundasamsetningarinnar.

Rannsóknasvæði

Íslandshaf takmarkast af Íslands-Grænlands-hryggnum og Íslandi í suðri, Grænlandi í vestri og línu sem hugsast dregin frá Tobinhöfða að

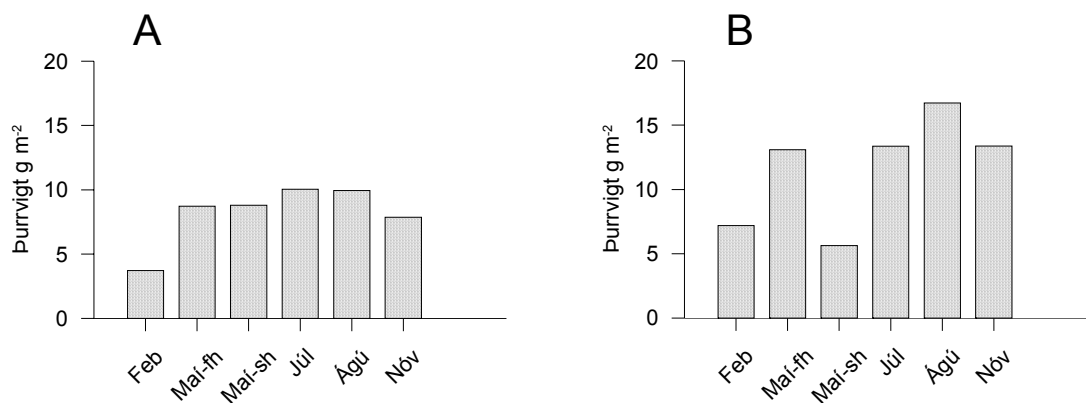
suðurodda Jan Mayen í norðri (Unnsteinn Stefánsson 1999) (1. mynd). Í austri takmarkast Íslandshaf af Jan Mayen-hryggnum sem er neðansjárvarhryggur sem liggur suður frá Jan Mayen og að Færeysja-Íslands-hryggnum. Kolbeinseyjarhryggurinn sem liggur frá miðju Norðurlandi og norður um skiptir Íslandshafi í tvö djúp (1. mynd).

Inn í Íslandshaf streymir sjór frá ólíkum hafsvæðum (1. mynd). Hlýr sjór berst einkum úr tveimur áttum. Úr suðri berst tiltölulega hlýr Atlantssjór með grein af Irmingerstraumnum, og úr austri leggur fremur hlýjan og saltan straum til norðvesturs úr Noregshafi. Kaldur og seltulágur pólsjór berst hins vegar inn á svæðið úr norðri með Austur-Grænlandsstraumnum (Unnsteinn Stefánsson 1962, Héðinn Valdimarsson & Svend Aage Malmberg 1999). Í Íslandshafi blandast svo þessar ólíku sjógerðir (grænu örvarnar á 1. mynd) og er hlutfall hvors um sig mjög breytilegt eftir svæðum og árstímum. Út af Norðvestur- og Norðurlandi verða iðulega skörp skil á milli Atlantssjárvarins og pólsjárvarins. Þessi sjófræðilegu atriði, setja svo mark sitt á dýrasvifið.



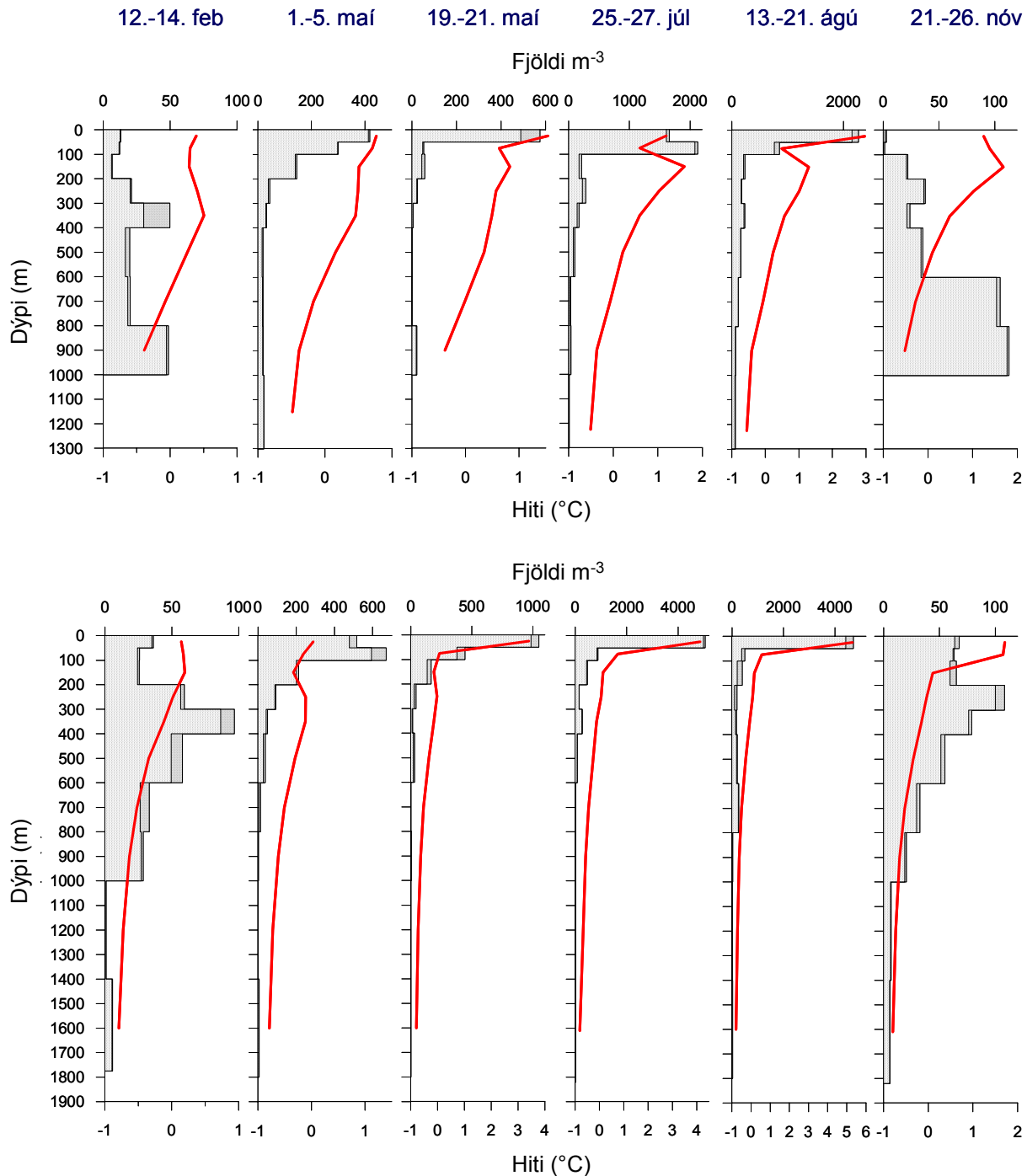
2. mynd. Milliáta. Árstíðabreytingar í fjölda svifdýra í Íslandshafi frá febrúar til nóvember. Myndin sýnir meðaltöl tveggja stöðva vestan við Kolbeinseyjarhrygg (A) og austan við hann (B). Maí-fh og Maí-sh merkja fyrri og seinni hluta í maí. Gögnunum sem liggja til grundvallar var safnað með Multinet-háfi 2006, 2007 og 2008 (sbr. Tafla 1). Efri myndirnar sýna fjölda í öllum vatnsbolum (fjöldi einstaklinga m^{-2} , fyrir allan vatnsbolinn) en þær neðri hlutfallslegan fjölda (%).

Figure 2. Mesozooplankton. Seasonal changes in numbers of zooplankton in Iceland Sea from February – November. The values are means from two stations west of the Kolbeinsey Ridge (A) and two stations east of the Ridge (B). Maí-fh and Maí-sh denote the first and second halves of May, respectively. The samples were collected with a Multinet during 2006, 2007 and 2008 (Table 1). The upper panels show total numbers (numbers m^{-2} , whole water column) and the lower panel relative composition (%). Light grey shading: copepods ('krabbafær'); dark grey shading: other groups ('Aðrir hópar').



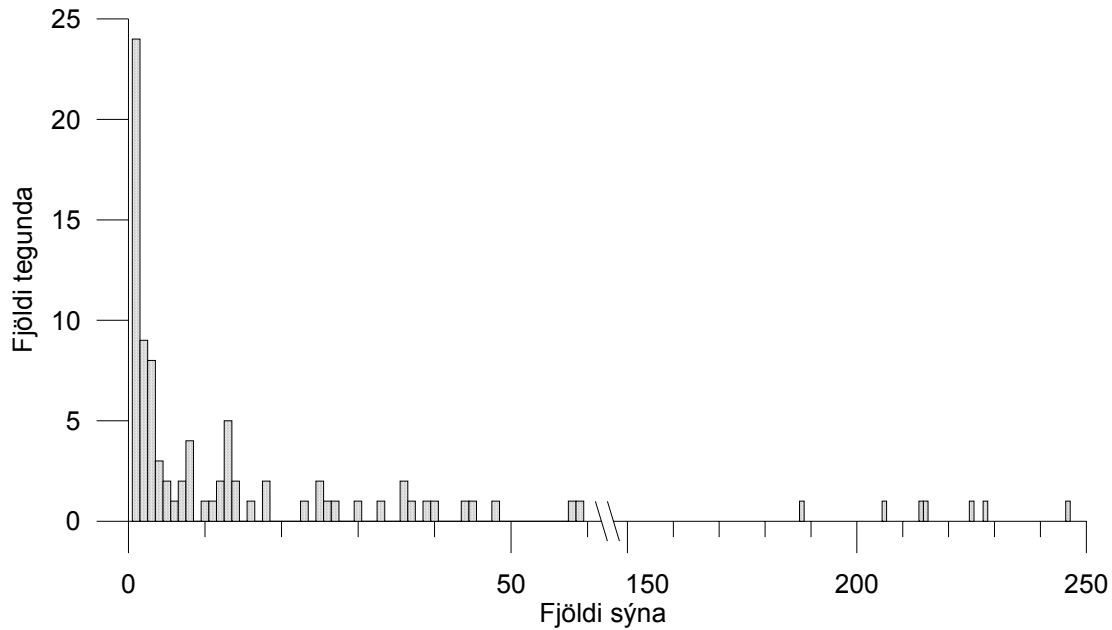
3. mynd. Krabbafær. Árstíðabreytingar í lífmassa krabbafíóa í Íslandshafi frá febrúar til nóvember (þurrvígt $g m^{-2}$ fyrir allan vatnsbolinn). Myndin sýnir meðaltöl tveggja stöðva vestan við Kolbeinseyjarhrygg (A) og austan við hann (B). Maí-fh og Maí-sh merkja fyrri og seinni hluta í maí. Gögnunum sem liggja til grundvallar var safnað með Multinet-háfi 2006, 2007 og 2008, (sbr. Tafla 1).

Figure 3. Copepods. Seasonal changes in biomass of copepods in Iceland Sea from February – November (dry weight $g m^{-2}$, whole water column). The values are means from two stations west of the Kolbeinsey Ridge (A) and two stations east of the Ridge (B). Maí-fh and Maí-sh denote the first and second halves of May, respectively. The samples were collected with a Multinet during 2006, 2007 and 2008 (Table 1).



4. mynd. Milliáta. Dreifing dýrasvífs og hita með dýpi í Íslandshafi frá febrúar til nóvember. Myndin sýnir meðaltöl tveggja stöðva vestan (efri myndaröð) og austan (neðri myndaröð) Kolbeinseyjarhryggjar. Hafa ber í huga að gögnunum sem liggja til grundvallar var safnað 2006, 2007 og 2008 (sbr. Tafla 1, og einnig að kvarðinn fyrir fjölda er breytilegur á milli mánaða og svæða. Ljósgrátt: krabbafær; dökkgrátt. Aðrir hópar.

Figure 4. Mesozooplankton. Vertical distribution of zooplankton (numbers m^{-3}) from February – November. The values are means from two stations west of the Kolbeinsey Ridge (A) and two stations east of the Ridge (B). Temperature profiles obtained by simultaneous CTD casts are also shown. The data were sampled during 2006, 2007 and 2008 (Table 1). Note the change in horizontal scales between sampling times and locations. Light grey shading: copepods; dark grey shading: other groups.



5. mynd. Milliáta. Samband fjölda sýna og tegunda fyrir öll sýni sem safnað var með WP2- og Multinet-háfum og greind voru til tegunda (sbr. Tafla 1).

Figure 5. Mesozooplankton. Number of species as a function of number of observations for all WP2 and Multinet samples that were analysed for species composition (Table 1).

Niðurstöður

Árstíðabreytingar

Á 2. mynd er sýndur fjöldi dýrasvifs á mismunandi árstímum vestan og austan Kolbeinseyjar-hryggjarins. Gögnunum sem liggja til grundvallar var ekki safnað á sama ári, en ættu engu að síður að gefa vísbendingar um meginlínur í árstíðabreytingum dýrasvifs í Íslandshafi. Árstíðabreytingar í fjölda einkenndust af lágum vetrargildum (<50 000 einstaklingar m⁻²), hærri gildum um vorið (maí, ~70 000–100 000 einstaklingar m⁻²) og einu aðalhámarki um sumarið í júlí og ágúst (~300 000–400 000 einstaklingar m⁻²). Eftir ágúst fækkaði dýrunum aftur og í nóvember fundust fremur fá dýr (~50 000 einstaklingar m⁻²).

Greinilegt er að fjöldinn var yfirleitt hærri austan Kolbeinseyjarhryggjarins en vestan hans (2. mynd). Þannig reyndist árlegur meðalfjöldi svifdýra yfir árið um 200 000 einstaklingar m⁻² austan við hrygginn en um 135 000 einstaklingar m⁻² vestan við hann.

Krabbaflær voru ríkjandi hópur, oftast um og yfir 85% af öllum svifdýrum sem fundust (2. mynd). Þær breytingar sem urðu á lífmassa og fjölda krabbaflóa yfir árið voru ekki í takt (sbr. 2. og 3. mynd). Vestan hryggjarins var þó lífmassinn, eins og fjöldinn, í lágmarki í febrúar (~4 g þurrvigt m⁻²), en hélst svo hár frá maí til nóvember (~9-11 g þurrvigt m⁻²). Austan

Kolbeinseyjarhryggjar mældust lægstu gildin í febrúar og síðari hluta maí (~5-8 g þurrvigt m⁻²) en há á öðrum tímum (~14-18 g þurrvigt m⁻²) (3. mynd).

Eins og með árlegan meðalfjölda svifdýra, var meðallífmassi krabbaflóa yfir árið talsvert hærri austan við Kolbeinseyjarhrygginn (~12 g m⁻²) en vestan við hann (~9 g m⁻²) (3. mynd).

Að vetrinum (nóvember-febrúar) hélt milliátan sig aðallega í dýpri lögum sjávar (~200-1000 m) við mjög lágan hita (~0°C), var komin upp í yfirborðslögin í maí (<100 m) þar sem hún hélt sig þar til í ágúst, en eftir það fóru stofnarnir að færa sig aftur á vetursetudýpi neðar í vatnsbolnum (4. mynd). Það er athyglisvert að yfir vetrartímann (febrúar og nóvember) hélt stór hluti átunnar sig talsvert dýpra vestan við hrygginn (~600-1000 m) en austan við hann (~200-600 m). Aðallega var hér um að ræða tegundirnar pólátu (*Calanus hyperboreus*), *Metridia longa*, *Oithona* spp. og *Oncaea* spp. (óbirt gögn) og niðurstöðurnar endurspeglu þannig að þessar tegundir hafa vetursetu á dýpra vatni vestan við hrygginn en austan hans.

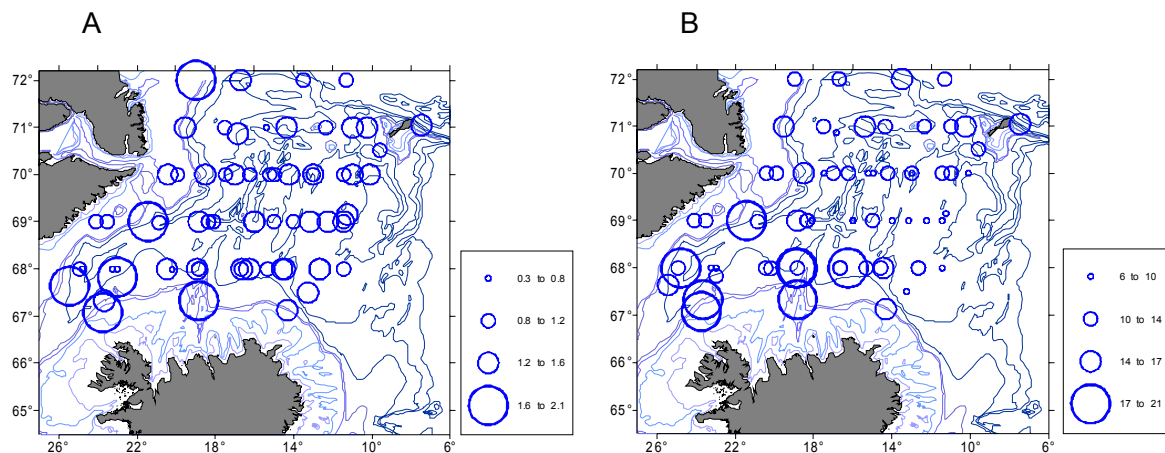
Tegundasamsetning

Alls fundust 101 tegund eða greiningahópur í þeim 247 WP2- og Multinet-sýnum sem voru greind til tegunda (Tafla 3). Margar tegundanna voru tiltölulega sjaldgæfar. Þannig komu 24 tegundir og hópar aðeins fyrir í einu sýni og

Tafla 3. Millisvíf. Skrá yfir tegundir og hópa sem fundust í WP2 og Multinet-sýnum frá Íslandshafi árin 2006, 2007 og 2008 og í hversu mörgum sýnum þær fundust. Heildarfjöldi greindra sýna var 247.

Table 3. Mesozooplankton. Species and groups collected in the Iceland Sea by the WP2 and Multinet during 2006 - 2008 and the number of samples in which they were found. The total number of samples analysed was 247.

Flokkunareining	Sýni	Flokkunareining	Sýni
PROTOZOA		COPEPODA (Frh.)	
<i>Ellobiopsis</i> spp.	1	<i>Gaetanus affinis</i>	4
<i>Globorotalia truncatulinoides</i>	1	<i>Gaetanus brevispinus</i>	58
Foraminifera ógreint	149	<i>Gaetanus tenuispinus</i>	40
Radiolaria ógreint	44	<i>Haloptilus longicornis</i>	1
Tintinnida ógreint	25	<i>Heterohabdus norvegicus</i>	63
Protozoa ógreint	2	<i>Metridia brevicaudata</i>	3
CNIDARIA		<i>Metridia longa</i>	189
<i>Aglantha digitale</i>	37	<i>Metridia lucens</i>	2
Ógreint	75	<i>Metridia</i> spp.	3
SIPHONOPHORA		<i>Microcalanus</i> spp.	149
<i>Lensia conoidea</i>	1	<i>Microsetella norvegica</i>	12
Siphonophora ógreint	13	<i>Oithona</i> spp.	226
CTENOPHORA		<i>Oncaea</i> spp.	215
Ógreint	3	<i>Phaennidae</i> spp.	2
NEMTODA		<i>Pleuromamma robusta</i>	1
Ógreint	1	<i>Pseudaetidis armatus</i>	13
POLYCHAETA		<i>Pseudocalanus</i> spp.	216
<i>Pelagobia</i> spp.	16	<i>Pseudochirella spectabilis</i>	1
<i>Tomopteris</i> spp.	2	<i>Pseudophaenna typica</i>	1
<i>Trousiopsis</i> spp.	1	<i>Scaphocalanus magna</i>	23
Aphroditoidea	1	<i>Scolecithricella minor</i>	12
Typhloscolecidae	1	<i>Spinocalanus</i> spp.	1
Polychaeta ógreint	30	<i>Temora longicornis</i>	13
GASTROPODA		<i>Xanthocalanus</i> spp.	2
<i>Clione limacina</i>	7	Idyaeidae	1
<i>Limacina balea</i>	1	Harpacticoida ógreint	3
<i>Limacina helicina</i>	3	Mormonilla ógreint	1
<i>Limacina lesururii</i>	1	OSTRACODA	
<i>Limacina retroversa</i>	6	<i>Conchoecia borealis</i>	83
<i>Limacina</i> spp.	33	<i>Conchoecia</i> spp.	45
Gastropoda ógreint	3	Ostracoda ógreint	39
Pteropoda ógreint	1	CIRRIPIEDIA	
BIVALVIA		Cirripedia ógreint	10
Bivalvia ógreint	18	ISOPODA	
CLADOCERA		Isopoda ógreint	36
<i>Evadne nordmanni</i>	5	AMPHIPODA	
<i>Podon leuckarti</i>	5	<i>Apherusa</i> spp.	4
COPEPODA		<i>Eusirus holmi</i>	1
<i>Acartia</i> spp.	14	<i>Gammarus wilkitzkii</i>	2
<i>Aetidae</i> spp.	36	<i>Themisto abyssorum</i>	80
<i>Aetideopsis multiserrata</i>	13	<i>Themisto gaudichaudi</i>	2
<i>Aetideopsis rostrata</i>	18	<i>Themisto libellula</i>	59
<i>Aetideopsis serrata</i>	1	Astyridae	2
<i>Aetideopsis</i> spp.	8	EUPHAUSIACEA	
<i>Bradyidius similis</i>	7	<i>Meganyctiphanes norvegica</i>	11
<i>Calanus finmarchicus</i>	247	<i>Thysanoessa inermis</i>	26
<i>Calanus glacialis</i>	113	<i>Thysanoessa longicaudata</i>	98
<i>Calanus hyperboreus</i>	207	<i>Thysanoessa raschi</i>	3
<i>Centropages typicus</i>	1	MYSIDACEA	
<i>Chiridus armatus</i>	8	<i>Boreomysis arctica</i>	1
<i>Chiridus obtusifrons</i>	4	DECAPODA	
<i>Chiridus</i> spp.	3	Galatheidea lirfur	1
<i>Chiridus tenuispinus</i>	8	<i>Hymenodora glacialis</i>	14
<i>Clausocalanoidae</i>	1	Natantia ógreint	8
<i>Euaugaptilus</i> spp.	1	CHAETOGNATHA	
<i>Euchaeta barbata</i>	27	Chaetognatha ógreint	229
<i>Euchaeta barbata</i> f. <i>farrani</i>	13	ECHINODERMATA	
<i>Euchaeta glacialis</i>	78	Ophiuroidea ógreint	25
<i>Euchaeta hansenii</i>	2	LARVACEA	
<i>Euchaeta norvegica</i>	48	Larvacea ógreint	89



6. mynd. Milliáta. Tegundafjölbreytni dýrasvifs í yfirborðslögum (0-50m) í júlí 2006 og ágúst 2007, 2008, metinn með Shannon-Wiener fjölbreytileikastuðli (A) og fjölda tegunda (B). Sýnum var safnað með WP2- og Multinet-háfum.

Figure 6. Mesozooplankton. Species diversity of zooplankton in surface layers (0-50 m) in July 2006 and August 2007, 2008, as assessed by the Shannon-Wiener diversity index (A) and number of species (B). The samples were collected with WP2 and Multinet.

aðeins ein tegund, rauðáta (*Calanus finmarchicus*), fannst í þeim öllum (5. mynd).

Sýnin sem tekin voru úr öllum vatnsbolnum og á mismunandi árstímum (Multinet-sýnin), gefa raunhæfasta mynd af hlutfallslegum fjölda og lífmassa tegundanna yfir árið. Krabbaflær voru langalgengasti hópur dýrasvifs (>90% af allri milliátu miðað við fjölda).

Sé tekið mið af fjölda voru algengustu krabbaflærnar tegundirnar *Oithona* spp.

Tafla 4. Stórátutegundir (marflær og ljósáta) í Íslandshafi sem komu í Tucker-háfana og hlutfall þeirra af samantölum heildarfjölda marflóa og ljósátu. Sýnunum sem liggja til grundvallar útreikningum var safnað með Tucker-háf í ágúst 2007 og 2008.

Table 4. Macrozooplankton species (amphipods and euphausiids) in the Iceland Sea caught by the Tucker-trawl and relative abundance (as percentage of total number of amphipods and euphausiids). The values are based on samples collected in August 2007 and 2008.

Tegund	Hlutfall (%)
AMPHIPODA	
<i>Gammaracanthus loricatus</i>	<0.5
<i>Gammarus wilkitzkii</i>	<0.5
<i>Hyperia galba</i>	<0.5
<i>Hyperoche medusarum</i>	<0.5
<i>Themisto abyssorum</i>	66.7
<i>Themisto gaudichaudii</i>	<0.5
<i>Themisto libellula</i>	7.8
EUPHAUSIACEA	
<i>Meganyctiphanes norvegica</i>	2.1
<i>Thysanoessa inermis</i>	6.5
<i>Thysanoessa longicaudata</i>	16.8

(aðallega *O. similis*) (~36% af öllum krabbaflóm), rauðáta (~18%), *Pseudocalanus* spp. (~16%), *Oncaea* spp. (aðallega *O. conifera*) (~12%), *M. longa* (~7%) og póláta (*C. hyperboreus*) (~4%). Um 92% af öllum krabbaflóm sem fundust í sýnunum tilheyrðu þessum sex tegundum.

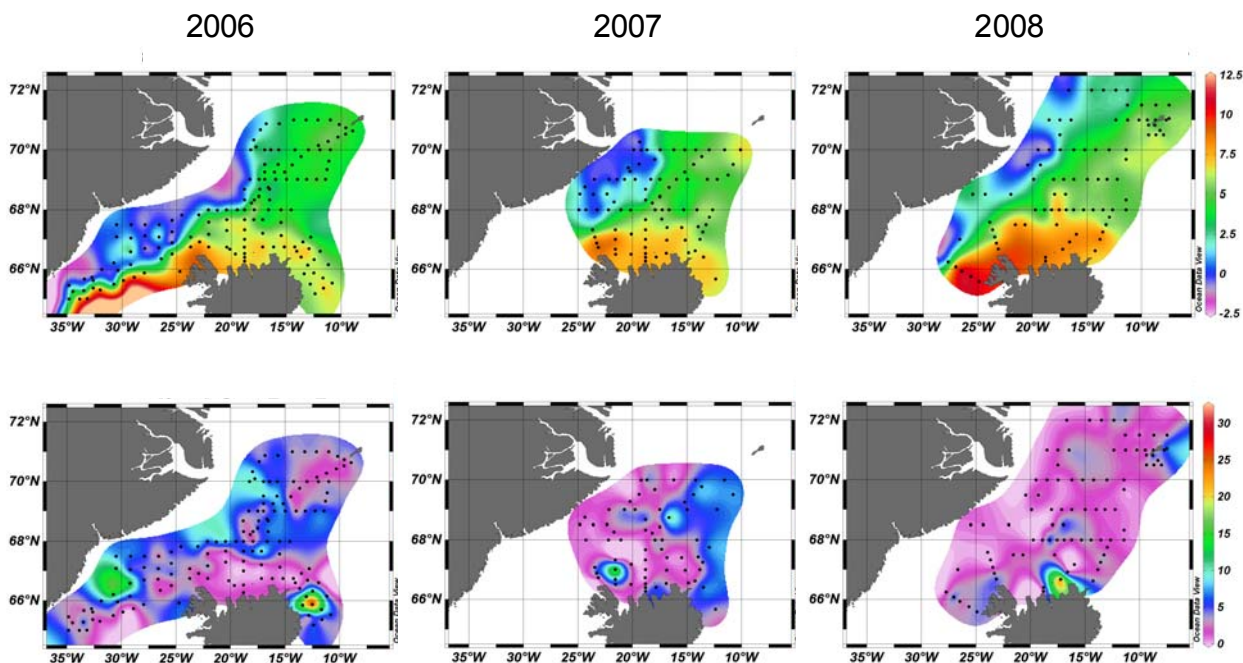
Póláta hafði hins vegar mestan lífmassa (~45% af öllum krabbaflóm miðað við lífmassa), þá rauðáta (~28%), *M. longa* (~17%), *Pseudocalanus* spp. (~3%), *Oithona* spp. (~2%) og loks *Euchaeta glacialis* (~1%) Þessar sex tegundir mynduðu saman um 95% af lífmassa krabbaflóa.

Í júlí og ágúst var tegundafjölbreytni dýrasvifsins í yfirborðslögum, hvort sem hún er metin sem fjöldi tegunda í sýni eða skv. svonefndum Shannon-Wiener fjölbreytileikastuðli, yfirleitt mest við landgrunnsbrúnirnar norður af Íslandi og austur af Grænlandi, en lægri í miðju Íslandshafi (6. mynd).

Í Tucker-háfinn komu sjö tegundir marflóa. *Themisto abyssorum* var algengasta marflóin (~67%), en *T. libellula* næstalgengust (~8%) (Tafla 4). Þrjár ljósátutegundir komu í Tucker-háfana og var sporðkrili (*Thysanoessa longicaudata*) algengast (~17%), en augnsíli (*T. inermis*) næstalgengast (~6%) (Tafla 4).

Útbreiðsla dýrasvifs í júlí-ágúst

Á 7. mynd er sýnd dreifing lífmassa dýrasvifs af millistærð í yfirborðslögum í júlí og ágúst árin 2006-2008 (þurrvig g m⁻², 0-50 m). Í júlí árið 2006 var útbreiðslan vestlægari en í ágúst árin 2007 og 2008. Ef undan er skilin ein



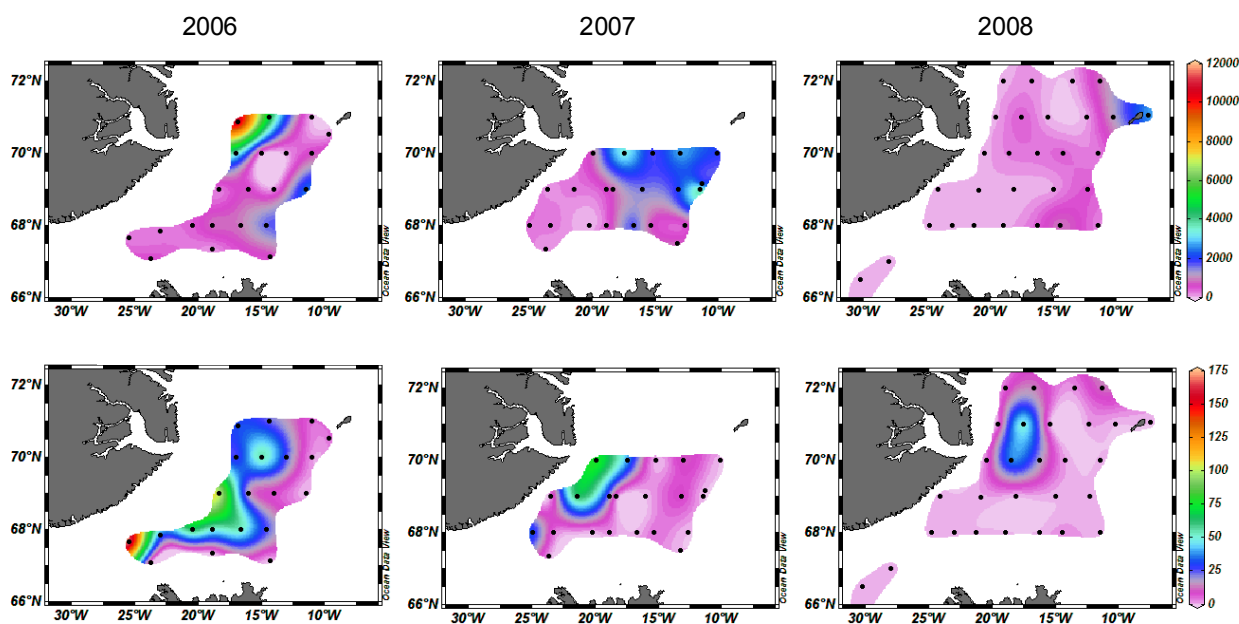
7. mynd. Sjávarhiti (meðaltöl 0-50 m) (efri myndaröð) og heildarlífmassi milliátu í yforborðslögum (burrvigt $g\ m^{-2}$, 0-50 m) (neðri myndaröð) í Íslandshafi í júlí 2006 og ágúst 2007 og 2008. Sýnum var safnað með WP2-háfum.

Figure 7. Sea temperatures (means from 0-50 m) (upper panel) and total mesozooplankton biomass (dry weight $g\ m^{-2}$, 0-50 m) (lower panel) in Iceland Sea during July 2006 and August 2007 and 2008. The samples were collected with WP2 nets.

rannsóknastöð í Héraðsdjúpi, þar sem óvenju mikið fannst af átu, mældust þannig hæstu gildin árið 2006 í köldum sjó vestarlega í Íslandshafi og við ísjaðarinn í Grænlandssundi. Árið 2007 veiddist hins vegar mest af átu tiltölulega austarlega í Íslandshafi. Ári seinna var

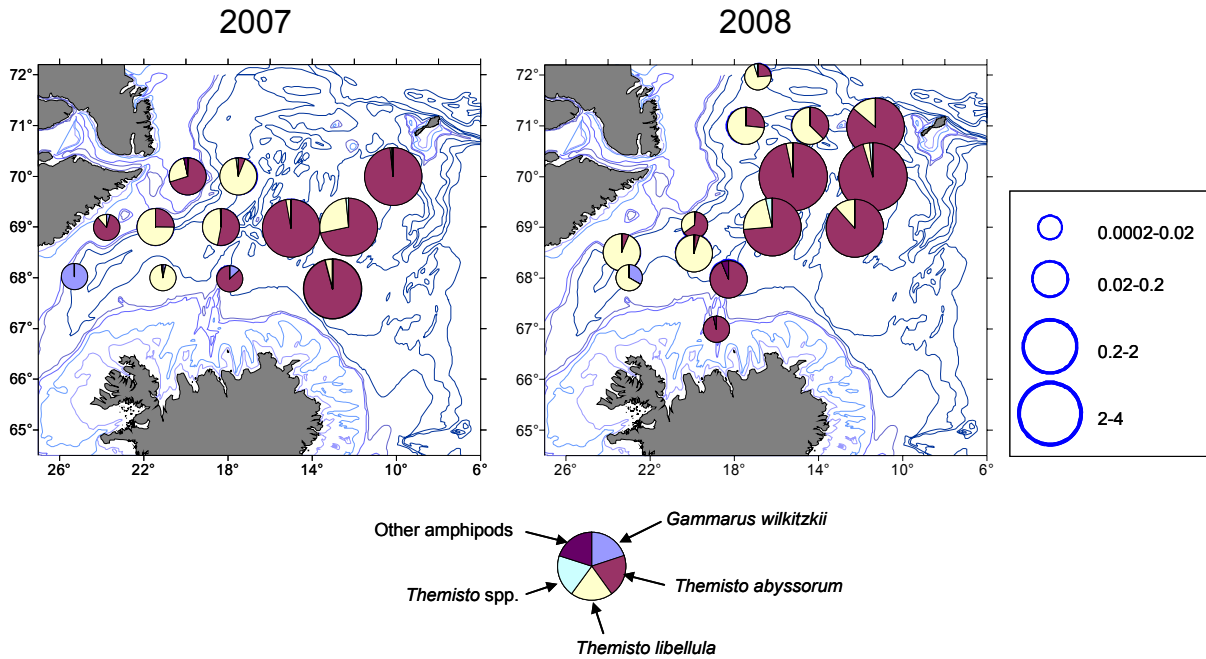
átumagnið heldur lægra en hin árin en yfirleitt mest á áhrifasvæði hlýsjávarins tiltölulega sunnar- og austarlega (7. mynd).

Eins og áður sagði voru póláta og rauðáta mikilvægustu krabbaflærnar sé tekið mið af lífmassa. Á 8. mynd er sýnd útbreiðsla þessara



8. mynd. Útbreiðsla rauðátu (efri myndaröð) og pólátu (neðri myndaröð) í yfirborðslögum (fjöldi einstaklinga m^{-3} , 0-50 m) í Íslandshafi í júlí 2006 og ágúst 2007 og 2008. Sýnum var safnað með WP2- og Multinet-háfum.

Figure 8. Distribution of *Calanus finmarchicus* (upper panel) and *C. hyperboreus* (lower panel) in surface layers (numbers m^{-3} , 0-50 m) of the Iceland Sea during July 2006 and August 2007 and 2008. The samples were collected with WP2 and Multinet.



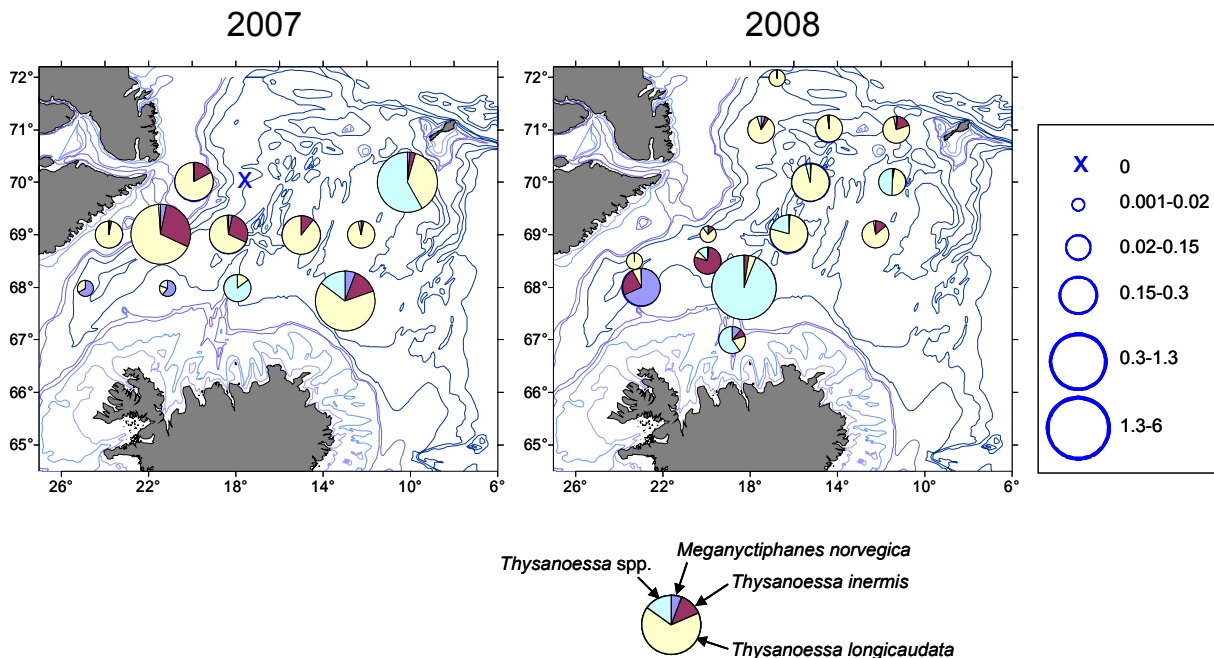
9. mynd. Stórátá. Útbreiðsla marflóategunda í Íslandshafi árin 2007 og 2008 (fjöldi einstaklinga m^{-3} , 0-100 m). Sýnunum var safnað með Tucker-háfum.

Figure 9. Macrozooplankton. Distribution of amphipods in Iceland Sea during August 2007 and 2008 (numbers m^{-3} , 0-100 m). The samples were collected with Tucker-trawls.

tegunda í júlí (2006) og ágúst (2007 og 2008). Ef frá er talin ein rannsóknastöð norðaustarlega árið 2006, var rauðata öll árin yfirleitt algengust tiltölulega austarlega á rannsóknasvæðinu, þar sem áhrif hlýs Atlantssjávar voru hvað mest (sbr. 7. mynd). Yfirleitt fannst hins vegar mest

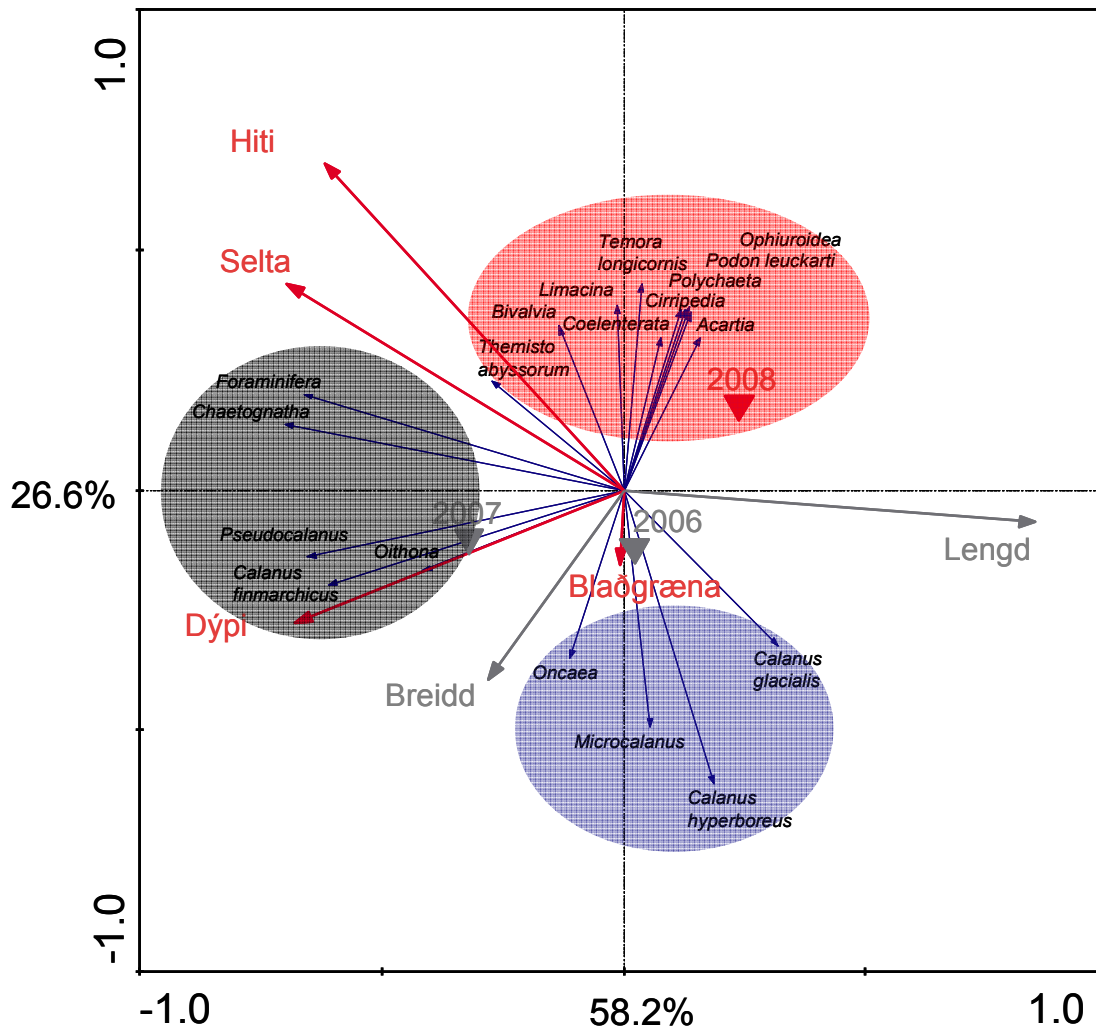
af pólátu fremur vestarlega í Íslandshafi á áhrifasvæði pólsjávar úr Austur-Grænlandsstraumi (sbr. 7. og 8. mynd).

Yfirleitt veiddist mest af stórátutegundum (marflóm og ljósátu) tiltölulega norðar- og austarlega í Íslandshafi (9. og 10. mynd). Al-



10. mynd. Stórátá. Útbreiðsla ljósátutegunda í Íslandshafi í árin 2007 og 2008 (fjöldi einstaklinga m^{-3} , 0-100 m). Sýnunum var safnað með Tucker-háfi.

Figure 10. Macrozooplankton. Distribution of euphausiids in Iceland Sea during August 2007 and 2008 (numbers m^{-3} , 0-100 m). The samples were collected with Tucker-trawl.



11. mynd. Milliáta. Niðurstöður RDA-hnitunargreiningar þar sem könnuð voru áhrif umhverfisþátta (blaðgrænu (mg m^{-2} , 0-30 m), hitastigs og seltu (meðaltöl frá 0-50 m), botndýpis og árs) sem skýribreyta á tegundasamsetningu dýrasvifs af milliáta á yfirborðslögum (fjöldi einstaklinga m^{-3} , 0-50 m) árin 2006 (júlí), og 2007 og 2008 (ágúst) í Íslandshafi. Fyrsti hnitunarsinn útskýrir 58,2% af þeim breytileika sem hægt er að útskýra með umhverfisbreytunum (29%) en annar ásinn 26,6%. Ár eru sett inn í greininguna sem flokkunarbreytur, táknaðar með þríhyrningum. Til að taka tillit til þess breytileika sem kann að skapast af því að sýnin voru ekki tekin á sama tíma öll árin (í júlí 2006 en ágúst 2007 og 2008) er dagnúmer sett inn sem fylgibreyta. Rauðu örvarnar og rauði þríhyrningurinn hafa marktæk áhrif á röðunina, en gráar örvar og þríhyrningar tákna hlutlausar breytur sem ekki hafa áhrif í líkaninu. Varðandi túlkun myndarinnar vísast í meginmál.

Figure 11. Mesozooplankton. RDA biplot of mesozooplankton species abundances (numbers m^{-3} , 0-50 m) (thin black arrows) and environmental variables (red and grey arrows) in the Iceland Sea during 2006 (July), 2007 and 2008 (August). Environmental variables are chlorophyll a, temperature and salinity (means from 0-50 m), bottom depth and year. First canonical axis explains 58.2% of species-environment relationship, second axis explains 26.6%. Year is put into the analysis as categorical variable and denoted as triangles (centroids). Day of the year is covariable to subtract variability due to different sampling times. Red arrows or triangles significantly explain variation in zooplankton community structure. Insignificant variables (grey arrows and triangles) are passive and do not influence the analysis. The arrows point in the direction of steepest increase of the respective variable. The angles between them reflect their correlations. Taxa with <10 fit value to the first axis are not shown (ter Braak and Smlauer 2002). For RDA model design and further explanation see text.

gengasta marflóin, *Themisto abyssorum*, hafði austlægari útbreiðslu en sú næstalgengasta (*T. libellula*). (9. mynd). Marflóin *Gammarus wilkitzkii* var algengust í sýnum sem tekin voru við landgrunnsbrúnina Grænlandsmegin í Íslandshafi. Bæði sporðkríli, sem var algengasta ljósátutegundin, og augnsíli virtust hafa norðlægari útbreiðslu en náttlampi (*M. norvegica*) (10. mynd).

Útbreiðsla dýrasvifs í tengslum við umhverfisþætti

Til að kanna áhrif umhverfisþátta á útbreiðslu og samfélagsgerð milliáta í yfirborðslögum (0–50 m) var notuð fjölþátta RDA röðunargreining (11. mynd). Eins og sagði í kaflanum um aðferðir hér fyrir framan, raðar greiningin tegundum og sýnum í fjölvíðu rúmi sem umhverfisbreyturnar hafa áhrif á. Þannig

Tafla 5. Milliáta. Umhverfispættir sem hafa marktæk áhrif sem skýribreytur (Monte Carlo próf, 999 óbundnar umraðanir, $p < 0.05$) á tegundasamsetningu dýrasvifs af millistærð í yfirborðslögum árin 2006 (júlí), og 2007 og 2008 (ágúst) í Íslandshafi, raðað í réttari röð eftir mikilvægi. Í töflunni er sýnt hversu mikinn breytileika umhverfispættirnir útskýra (hlutfall af heildarbreytileika sem líkanið útskýrir), p - og F -gildi.

Table 5. Mesozooplankton. Ranking of environmental variables that significantly (Monte Carlo permutation test in RDA, $p < 0.05$) influenced distribution of mesozooplankton in the Iceland Sea in 2006 (July) and 2007 and 2008 (August). The proportion of explained variability by each variable and the p - and F -values are also given.

Skýribreyta	Útskýrður breytileiki	p	F
Selta (0-50 m)	0.11	0.002	9.32
2008	0.08	0.002	6.97
Botndýpi	0.05	0.002	4.34
Hiti (0-50 m)	0.02	0.006	2.71
Blaðgræna (0-30 m)	0.03	0.03	2.20
Heild	0.29		

má lesa úr myndinni hvaða áhrif umhverfispættirnir hafa á samfélagsgerð dýrasvifsins.

Í ljós kom að selta, botndýpi, hitastig og blaðgræna höfðu marktæk áhrif á það hvernig tegundirnar raðast og þar með á samfélagsgerð svífdýra í Íslandshafi síðsumars. Þá reyndist árið 2008 einnig hafa marktæk áhrif á röðunina, en þá voru t.d. *Acartia* spp., *Podon leuckarti*, hrúðurkarlalirfur (Cirripedia), holdýr (Cnidaria), *Temora longicaudata* og vængjasniglar (*Limacina* spp.) hlutfallslega algengari en hin tvö árin (11. mynd). Saman útskýrðu ofantaldar skýribreytur 29% af breytileikanum í tegundasamsetningu, seltan mest (11%), þá árið 2008 (8%) og botndýpi (5%). Hitastig og blaðgræna skýrðu hvort um sig 2-3% breytileikans í samfélagsgerð (Tafla 5).

Myndin sýnir einnig að fallandinn samsíða fyrsta ásnúm útskýrir mest eða um 58% af breytileikanum sem unnt er að skýra með skýribreytunum (29%), en fallandinn samsíða öðrum

ásnum um 27%. Fyrsti ásnúm lýsir fallanda frá tegundum sem fundust einkum á miklu dýpi þar sem selta var tiltölulega há (rauðáta, *Pseudocalanus*, pílormar, götungar) til tegunda sem héldu sig grynna og við lægri seltu (t.d. *Acartia* spp. og ísáta (*C. glacialis*)) (11. mynd).

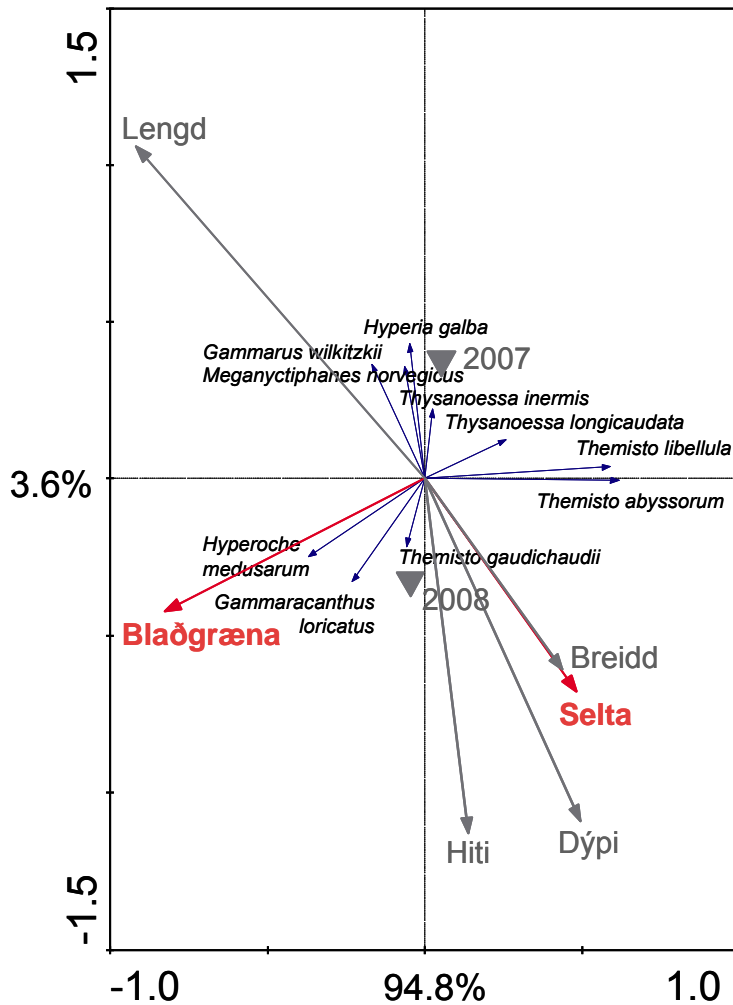
Fyrir þær tegundir sem mestu skipta í líf-massa (pólátu og rauðátu) leiðir myndin einnig í ljós að fremur lítið fannst af þeim árið 2008 (11. mynd). Það er raunar í samræmi við útbreiðslumynstrið sem áður er lýst (8. mynd). Þótt lengd og breidd séu ekki látin hafa áhrif á röðunina er samt greinilegt af myndinni að bæði sjávarhiti og selta eru hærra austarlega á rannsóknasvæðinu (við lágur lengdargráður) en vestar. Þá má ráða af myndinni, að útbreiðsla rauðátu er almennt austlægari en pólátu (11. mynd), sem einnig er í samræmi við þá mynd af útbreiðslu tegundanna sem áður var greint frá (8. mynd).

Greina má þrjár meginsamfélagsgerðir eða hópa dýrasvifs (11. mynd). Austarlega á rannsóknasvæðinu er atlantískt samfélag þar

Tafla 6. Stóráta. Umhverfispættir sem hafa marktæk áhrif sem skýribreytur (Monte Carlo próf, 999 óbundnar umraðanir, $p < 0.05$) á tegundasamsetningu stórátu í yfirborðslögum árin 2007 og 2008 (ágúst) í Íslandshafi, raðað í réttari röð eftir mikilvægi. Í töflunni er sýnt hversu mikinn breytileika umhverfispættirnir útskýra (hlutfall af heildarbreytileika sem líkanið útskýrir), p - og F -gildi.

Table 6. Mesozooplankton. Ranking of environmental variables that significantly (Monte Carlo permutation test in RDA, $p < 0.05$) influenced distribution of mesozooplankton in the Iceland Sea in 2006 (July) and 2007 and 2008 (August). The proportion of explained variability by each variable and the p - and F -values are also given.

Skýribreyta	Útskýrður breytileiki	p	F
Blaðgræna (0-30 m)	0.27	0.006	9.63
Selta (0-100 m)	0.08	0.088	2.8
Heild	0.35		



12. mynd. Stórátta. Niðurstöður RDA-hnitunargreiningar þar sem könnuð voru áhrif umhverfisþátta (blaðgrænu (mg m^{-2} , 0-30 m), hitastigs og seltu (meðaltöl frá 0-100 m), botndýpis og árs) sem skýribreyta á tegundasamsetningu ljósátu og marflóa í yfirborðslögum (fjöldi einstaklinga m^{-3} , 0-100 m) í ágúst 2007 og 2008 í Íslandshafi. Fyrsti hnitunarásinn útskýrir langmest eða 94.8% af þeim breytileika sem unnt er að skýra með umhverfisbreytunum (35%) en annar ásinn ekki nema 3.6%. Ár eru sett inn í greininguna sem flokkunarbreytur, táknaðar með þríhyrningum. Til að taka tillit til þess breytileika sem kann að skapast af því að sýnin voru ekki tekin alveg á sama tíma árin 2007 og 2008 er dagnúmer sett inn sem fylgibreyta. Rauðu örvarnar (blaðgræna og selta) hafa marktæk áhrif á röðunina, en gráar örvar og þríhyrningar eru hlutlausar og hafa ekki áhrif í líkaninu. Varðandi túlkun myndarinnar visast í meginmál.

Figure 12. Macrozooplankton. RDA biplot of euphausiid and amphipod abundances (numbers m^{-3} , 0-100 m) (thin black arrows) and environmental variables (red and grey arrows) in the Iceland Sea during 2006 (July), 2007 and 2008 (August). Environmental variables are chlorophyll a, temperature and salinity (means from 0-50 m), bottom depth and year. First canonical axis explains 100% of species-environment relationship, the second axis being the first "residual" axis. Year is put into the analysis as categorical variable and denoted as triangles (centroids). Day of the year is covariable to subtract variability due to different sampling times. Red arrows or triangles significantly explain variation in zooplankton community structure. Insignificant variables (grey arrows and triangles) are passive and do not influence the analysis. The arrows point in the direction of steepest increase of the respective variable. The angles between them reflect their correlations. Taxa with <10 fit value to the first axis are not shown (ter Braak and Smilauer 2002). For RDA model design and further explanation see text.

sem rauðátta, *Pseudocalanus*, píloimar og götungar eru tiltölulega algengir, botndýpi mikið og sjávarhiti og selta tiltölulega há (ljósgráa svæðið vinstra megin á 11. mynd). Sunnarlega eru tegundir með tengsl við landgrunnssvæðin (t.d. *T. longicornis*, *Acartia* spp., *Podon leuckarti* og lirfur botndýra t.d. hrúðurkarla) þar sem er tiltölulega grunnt, sjávarhiti og selta há en blaðgræna lág (ljósrauða svæðið á 11 mynd). Af myndinni má ráða að þessar tegundir voru hvað algengastar árið 2008. Loks eru svo norrænar tegundir (póláta, ísáta, *Microcalanus* spp. og *Oncaea* spp.) norðarlega þar sem sjávarhiti og selta voru lág en blaðgræna með mesta móti (ljósbláa svæðið á 11. mynd).

RDA-greining var einnig notuð til að kanna áhrif umhverfisþátta á útbreiðslu ljósátu- og marfóategunda sem komu í Tucker-trollið (12. mynd). Greiningin leiddi í ljós að blaðgræna og selta höfðu sem skýribreytur marktæk áhrif á tegundasamsetninguna, en saman útskýrðu þær

33% af heildarbreytileikanum, blaðgræna þó langmest, 27% (Tafla 6).

Fyrsti ásinn útskýrir langstærstan hluta, eða um 95% þess breytileika sem hægt er að skýra með blaðgrænu og seltu (35%) og lýsir stigli frá umhverfi með lágum blaðgrænegildum (til hægri á 12. mynd) til umhverfis með háum gildum (til vinstri). *Themisto abyssorum* og *T. libellula* sýndu nánast samband við lág blaðgrænegildi og *Hyperoche medusarum* og *Gammaracanthus loricatus* við há (12. mynd)

Umræða

Árstíðabreytingar

Árstíðabreytingar í fjölda og lífmassa svifdýra á djúpslóð fyrir norðan land einkenndust af einu aðalhámarki í júlí og ágúst (2. og 3. mynd). Fyrri rannsóknir á landgrunnssvæðunum fyrir norðan og norðaustan land hafa einnig sýnt eitt hámark í átumagni, en þar

verður hámarkið fyrr (júní og júlí) og í ágúst er þar farið að draga verulega úr átumagni (Ástþór Gíslason & Ólafur S. Ástþórsson 1998, Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 2003), öfugt við það sem gerist á djúpmiðum í okkar rannsókn (2. og 3. mynd). Skýringin á því hversu átumagnið féll hratt í þessum eldri rannsóknum tengist sennilega því að þá var stofnstærð loðnu mun meiri en nú (Anon. 2010a) og því hefur afrán loðnunnar náð að hafa veruleg áhrif á átuvöxt. Aðalfæða loðnu er einmitt krabbaflær og ljósáta (Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1997a) og á árum áður fór hún sem kunnugt er í fæðugöngur langt norður í Íslandshaf (Hjálmar Vilhjálmsson 1994, 2002). Í miklum loðnuárum hefur loðnan því vafalaust haft mikil áhrif á átuvöxt og jafnvel stuðlað að fækkun átu síðsumars og á haustin. Í okkar rannsóknum (2006-2008) fannst hins vegar mjög lítið af loðnu í Íslandshafi (Ólafur K. Pálsson o.fl. 2012) og því hefur hún að öllum líkindum haft lítil ef nokkur áhrif á átuvöxt. Það er sennilega einnig skýring þess að vaxtar-tímabil átu í Íslandshafi náði eins langt fram á haustið og raun bar vitni.

Þótt hámark í fjölda og lífmassa krabbaflóa hafi farið saman í júlí og ágúst, er samræmi ekki gott á öðrum árstímum (sbr. 2. og 3. mynd). Það endurspeglar að þegar stofnstærðir stærstu átu-stofnanna voru í lágmarki í fjölda á vorin (febrúar-maí), var uppistaðan í þeim eldri og þyngri einstaklingar, að undirbúa hrygningu.

Bæði árlegur meðalfjöldi og meðalþyngd var hærri austan við Kolbeinseyjarhrygginn en vestan við hann (2. og 3. mynd). Þetta kann að endurspeglar meiri framleiðni dýrasvifs austan megin hryggjarins en einnig hitt að innflæði dýrasvifs sé meira inn á austursvæðið.

Tegundasamsetning

Krabbaflær voru langalgengasta flokkunar-einingin, >90% átunnar í flestum sýnum (2. mynd. Tafla 3), sem er í samræmi við fyrri niðurstöður frá norðurmörkum Íslandshafs (Ólafur S. Ástþórsson o.fl. 1995). Hátt hlutfall krabbaflóa er í samræmi við niðurstöður fjölmargra fyrri rannsókna, bæði við Ísland (Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1992, 1995, Ástþór Gíslason & Ólafur Ástþórsson 1995, 1998, Ástþór Gíslason o.fl. 2009) og á nálægum norðlægum hafsvæðum (Hassel 1986, Hirche o.fl. 1994).

Krabbaflærnar *Oithona* spp (aðallega *O. similis*) og rauðáta voru algengustu tegundirnar

í fjölda (Töflur 3 og 4). Það kemur ekki á óvart, enda algengustu krabbaflær hér við land og á nálægum svæðum (sjá t.d. Melle 2004). *O. similis*, er reyndar talin vera algengasta krabbafló í gervöllum heimshöfunum (Sabatini & Kiørboe 1994, Svensen & Kiørboe 2000, Galienne & Robins 2001). Sökum smæðar sinnar hefur hún þó sennilega litla þýðingu sem fæða unglöðnu og fullorðinnar loðnu, en er hins vegar mikilvægur þáttur í fæðu loðnuseiða (Ólafur K. Pálsson 1974). Rauðáta er aftur á móti mikilvæg fæðutegund loðnu á öllum aldursskeiðum (Ólafur K. Pálsson 1974, Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1997a).

Svifdýrafána Íslandshafs einkennist af því að tiltölulega fáar tegundir voru algengar. Til dæmis fannst aðeins ein tegund í öllum 247 sýnum og 6 í fleiri en 200 sýnum (5. mynd). Þetta er í samræmi við það sem gerist á öðrum norðlægum slóðum, þar sem vistkerfin einkennast af því að framleiðslan er borin uppi af tiltölulega fáum tegundum.

Tegundafjölbreytni dýrasvifsins reyndist yfirleitt mest á mörkum landgrunns og úthafs, bæði austur af Grænlandi og norður af Íslandi (6. mynd), en á þessum slóðum, norður af Íslandi, voru einmitt hefðbundin uppeldissvæði loðnu á árum áður (Hjálmar Vilhjálmsson 1994). Á þessum svæðum koma saman að sumu leyti ólík samfélög landgrunns og úthafs sem stuðlar að aukinni tegundafjölbreytni á markasvæðunum. Þá hefur það og þýðingu í þessu sambandi að við landgrunnsbrúnirnar mætast iðullega hlýir og kaldir straumar (1. og 7. mynd) sem bera með sér átu úr ólíkum áttum og frá ólíkum hafsvæðum sem aftur stuðlar að meiri tegundafjölbreytni á þessum svæðum.

Útbreiðsla í júlí-ágúst

Í stórum dráttum var útbreiðsla lífmassa dýrasvifs vestlægari síðsumars árið 2006 en árin 2007 og 2008 (7. mynd). Á þessu er engin örugg skýring, en kann að tengjast því að hafis var áberandi á vesturhluta rannsóknasvæðisins árið 2006, en ekki 2007 og 2008. Við ísjaðarinn eru skilyrði til vaxtar plötusvifs iðulega tiltölulega hagstæð (Sakshaug 1997) sem aftur leiðir til örari vaxtar dýrasvifs á áhrifasvæðum hafiss bæði við ísbrúnirnar og á svæðum sem ísinn hefur nýlega hopað frá.

Útbreiðsla í tengslum við umhverfisþætti

Þær skýribreytur sem mest áhrif höfðu á tegundasamsetningu milliátu í Íslandshafi voru

selta, botndýpi, sjávarhiti, blaðgræna og árið 2008, en saman skýrðu þessar breytur 29% af heildarbreytileikanum (Tafla 5, 11. mynd). Þetta kann að sýnast fremur lágt gildi en er þó samþærilegt því sem fundist hefur í svipuðum rannsóknum í Barentshafi, Fram-sundi og norður af Svalbarða (Blachowiak-Samolyk 2008). Samanburður af þessu tagi er þó mjög erfiður því að umfang einstakrar rannsóknar í tíma og rúmi, ásamt því hvaða umhverfisbreytur eru teknar með í hnitunargreininguna skipta miklu máli varðandi niðurstöðuna.

Í þessari rannsókn var selta mikilvægasta umhverfisbreytan (Tafla 5, 11. mynd). Á rannsóknatímabilinu var meðalselta í yfirborðslögum á bilinu 30.8–34.9, en talið er að sveiflur af þessari stærðargráðu hafi lítil áhrif á lífeðlisfræðilega þætti hjá dýrasvifi (McLaren o.fl. 1968, Kinne 1971). Því verður að telja ólíklegt að seltan sem slík hafi haft bein áhrif á tegundasamsetningu og útbreiðslu dýrasvifs. Miklu líklegra er að seltan sé hér vísbending um áhrif strauma á dýrasvifssamfélög. Í Íslandshafi blandast saman mismunandi sjógerðir sem geta borið með sér dýrasvif úr ólíkum áttum, atlantískar tegundir að sunnan og austan, en kaldsjávartegundir að norðan. Sennilegt er að áhrif seltu á samfélagsgerð endurspegli hér hversu straumar eru mikilvægir fyrir flutning tegunda frá einu svæði til annars og þar með á samfélagsgerð.

Það er athyglisvert að árið 2008 hafði næstmest áhrif á tegundasamsetninguna samkvæmt hnitunargreiningunni (Tafla 5, 11. mynd). Þetta merkir með öðrum orðum að það ár var tegundasamsetningin í einhverju frábrugðin því sem gerðist hin árin tvö (2006 og 2007 samkvæmt hnitunargreiningunni (Tafla 5, 11. mynd). Þetta merkir með öðrum orðum að það ár var tegundasamsetningin í einhverju frábrugðin því sem gerðist hin árin tvö (2006 og 2007). Samkvæmt hnitunargreiningunni einkenndist árið 2008 af hlutfallslega miklum fjölda ýmissa tegunda sem gjarnan halda sig í strandsjó eða yfir landgrunni (*Acartia* spp. *Temora longicornis*, lirlfur botndýra) (11. mynd). Þetta bendir helst til að mikið rek hafi verið af landgrunnsvæðunum úr suðri og inn í Íslandshaf og undirstríkar þannig enn frekar mikilvægi strauma og reks við tilflutning tegunda.

Botndýpi hafði einnig nokkur áhrif á samfélagsgerð dýrasvifs (11. mynd, Tafla 5). Vitað er að botndýpi getur haft bein áhrif á útbreiðslu

sumra átutegunda, því að sumar tegundir eru beinlínis háðar því að geta sest á botn eða lifað nærri honum hluta æviferilsins. Þannig er málum háttáð hjá ýmsum hlutasvifstegundum eins og lirlfum botndýra og eggjum og lirlfum fiska. Önnur svifdýr reiða sig á botnlæg dvalaregg til að þrauka veturinn (t.d. *Temora longicornis* og *Acartia* spp.) og eru því algengust á strandsvæðum. Þótt botndýpi hafi hér reynt hafa marktæk áhrif á samfélagsgerð svifdýra ber þess að gæta að á flestum rannsóknastöðum var botndýpi mjög mikið (dýpissvið allra stöðva 224–2240 m, ~90% sýna voru tekin á meira en 500 m dýpi) og því ólíklegt að um bein áhrif botnsins á samfélagsgerð sé að ræða, heldur er hitt líklegra að botndýpi endurspegli hér áhrif strauma og/eða sjógerða sem geta verið mismunandi eftir dýpi.

Hitastig hafði líka marktæk áhrif á útbreiðsluna (11. mynd). Vitað er að tiltölulega litlar breytingar í hitastigi geta haft bein áhrif á vöxt, æxlun og dánartölu og þannig á útbreiðslu svifdýra (McLaren o.fl. 1968, Kinne 1970). Hins vegar getur breytilegur sjávarhiti, á sama hátt og seltan, verið vísbending um sjó af ólíkum uppruna, og þar með geta áhrif sjávarhitans á tegundasamsetninguna verið óbein og vísbending um tilflutning tegunda með straumum. Á meðan ekki liggja fyrir nákvæmari gögn eða líkön um strauma á svæðinu er erfitt að skera úr um hvort um bein eða óbein áhrif hitans sé að ræða.

Blaðgræna er mælikvarði á lífmassa plöntusvifs g þótt hann hafi verið fremur lítill síðsumars (3,25–75 mg m⁻³, 0–30 m) hafði hann engu að síður marktæk áhrif á útbreiðslu milliátu skv. hnitunargreiningunni (Tafla 5, 11. mynd). Þótt lífmassinn sé ekki beinn mælikvarði á frumframleiðni, má samt telja líklegt að hann endurspegli að talsverðu leyti frumframleiðnina, og þar með áhrif hennar á samfélög dýrasvifsins.

Hvað varðar milliátuna benda niðurstöður hnitunargreiningarinnar til að um sé að ræða þrjár meginsamfélagsgerðir dýrasvifs í Íslandshafi og virðist skiptingin ráðast bæði af landfræðilegum þáttum (dýpi og hnattstöðu) og sjógerðum (sjávarhita og seltu) (11. mynd). Austarlega á svæðinu var atlantískt samfélag þar sem rauðáta, *Pseudocalanus*, pílormar og götungar voru algengir, botndýpi mikið og sjávarhiti og selta há. Á norðvesturhlutanum var norrænt samfélag þar sem póláta, ísáta, *Microcalanus* spp. og *Oncaea* spp. voru al-

gengar, sjávarhiti og selta lág en blaðgræna með mesta móti. Sunnarlega var loks samfélag tengt landgrunnsvæðunum norður af Íslandi þar sem *T. longicornis*, *Acartia* spp. og lirfur ýmissa botndýra voru algengastar og þar sem jafnframt var tiltölulega grunnt, sjávarhiti og selta há en blaðgræna lág. Þær niðurstöður sem hér hefur verið lýst um samfélög dýrasvifs í Íslandshafi eru í góðu samræmi við fjölmargar fyrri rannsóknir á útbreiðslu og samfélögum dýrasvifs í tengslum við hitafar og sjógerðir bæði hér við land og á öðrum norðlægum hafsvæðum (Planque & Fromentin 1996, Brodsky 1967, Hirche 1997, Mauchline 1998, Melle 2004, Ástþór Gíslason & Ólafur S. Ástþórsson 2004, Blachowiak-Samolyk 2008, Ástþór Gíslason o.fl. 2009). Þegar niðurstöðurnar eru skoðaðar ber að hafa í huga að gögnunum sem lögð eru til grundvallar var safnað á þremur árum og á tveggja mánaða tímabili. Því verður að telja líklegt að hér sé ekki einungis um augnabliksmynd að ræða, heldur séu niðurstöðurnar að mörgu leyti dæmigerðar fyrir ástandið síðsumars í Íslandshafi.

RDA-hnitunargreiningin leiddi í ljós að blaðgræna skýrði meginhluta þess breytileika sem kom fram í tegundasamsetningum marflóa og ljósátu síðsumars í Íslandshafi en selta lítinn hluta (12. mynd, Tafla 6). Sjávarhiti hafði þannig engin áhrif. Af útbreiðslumyndinni fyrir marflær (9. mynd) má þó ráða að *Themisto libellula* hafði vestlægari útbreiðslu en *T. abyssorum*. Báðar tegundir eru norrænar, þótt *T. libellula* sé talin hánorræn (Dalpadado o.fl. 2001, Melle 2004). Norðarlega í Noregshafi finnst hún þannig aðallega í mjög köldum sjó vestarlega, en *T. abyssorum* í hlýrri sjó austur. Útbreiðslumyndin (9. mynd) bendir til að *T. libellula* berist inn í Íslandshaf úr norðri með köldum Austur-Grænlandsstraumnum á meðan *T. abyssorum* reki þangað með tungu Atlantssjávar austan úr Noregshafi (sbr. líka 1. mynd).

Í Barentshafi og Noregshafi gegna marflær mikilvægu fæðuvistfræðilegu hlutverki (Dalpadado o.fl. 2001, 2008, Melle 2004). Þær eru rándýr sem éta annað dýrasvif og eru svo sjálfar bráð uppsjávarfiska og jafnvel sjófugla (Dalpadado o.fl. 2008, Skjoldal o.fl. 2004). Mergð þeirra í Íslandshafi (~0,02-2 einstaklingar m⁻³, 9 mynd) sem er jafnvel heldur meiri en í Barentshafi (Dalpadado o.fl. 2001) ásamt með upplýsingum um mikilvægi þeirra í fæðu loðnu og annarra lífvera á svæðinu (Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1997a, Hildur

Pétursdóttir o.fl. 2012) bendir til að fæðuvistfræðilegt mikilvægi þeirra sé ekki síðra í Íslandshafi. Óbirtar niðurstöður um þroska þessara marflóategunda benda til að þær æxlist á því svæði sem þeirra varð vart. Vestast á rannsóknasvæðinu fannst marflóin *Gammarus wilkitzkii* (9. mynd). Hún er algengust undir ís þar sem hún nærast á íspörungum (Dunbar 1964). Raunar er hún algerlega háð ísnum varðandi afkomu sína og lifir í aðeins mjög takmarkaðan tíma, eða um 4 daga, á íslausum svæðum (Werner o.fl. 1999). Hana hefur því líklega rekið undan ísnum og inn á athugunar-svæðið.

Ljósáta gegnir einnig vafalaust mikilvægu hlutverki í fæðuvistfræði svæðisins, einkum sú algengasta, sporðkríli. Talið er að hvorki hún né augnsíli náí að æxlast á heimskautasvæðum (Siegel & Nicoll 2000, Dalpadado o.fl. 2008). Í okkar rannsóknnum fundum við mikið af ungstigum beggja tegunda (*Thysanoessa* spp. á 10. mynd), og samkvæmt ítarlegri greiningu á ljósátu úr sýnunum, sem enn er ólokið, virðist sporðkríli ná að verða kynþroska í Íslandshafi.

Fyrri rannsóknir Hafrannsóknastofnunarinnar hafa leitt í ljós að breytilegt innflæði Atlantssjávar getur haft mikil áhrif á vöxt og viðgang lífríkisins á hafsvæðinu norðan Íslands (Þórunn Þórðardóttir 1977, 1984, Ólafur S. Ástþórsson o.fl. 1983, Unnsteinn Stefánsson & Jakob Jakobsson 1989, Unnsteinn Stefánsson & Jón Ólafsson 1991, Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1995, Ástþór Gíslason o.fl. 2009). Talið er að langvarandi lagskipting í köldum árum leiði til þess að næringarefni í yfirborðslögum endurnýjst treglega, sem aftur hafi í för með sér minni frumframleiðslu og þar með minni framleiðni svifdýra, sem eru háð frumframleiðni þörungasvifsins um fæðu. Á hinn bóginn er talið að aukið innflæði Atlantssjávar inn á norðurmið í hlýjum árum leiði til aukinnar blöndunar og endurnýjunar næringarefna í yfirborðslögum, sem aftur leiði til þess að vaxtartímabil plöntusvifsins lengist. Þetta kann síðan að hafa jákvæð áhrif á framleiðni svifdýranna. Árin 2006, 2007 og 2008 voru hlý ár með miklu innflæði hlýs Atlantssjávar inn á norðurmið (Anon. 2010b). Niðurstöður þeirrar rannsóknar sem hér er til umfjöllunar benda til þess að þegar svo árar sé vaxtartímabil átu í Íslandshafi um 5-6 mánuðir og átumagnið mest í júlí og ágúst (2. og 3. mynd). Tegundasamsetning og samfélagsgerð átunnar ber þess glöggt vitni að Íslandshaf er átakasvæði

hafstrauma úr ólíkum áttum sem ber með sér átu frá ólíkum hafsvæðum. Þannig endurspeglar niðurstöðurnar náíð samspil sjófræðilegra og líffræðilegra þátta í Íslandshafi. Mikilvægustu tegundirnar reyndust vera krabbaflærnar rauðáta og póláta, marflóin *Themisto abyssorum* og ljósátan sporðkríli .

Þakkir

Við viljum þakka áhöfnum rannsóknaskipanna Bjarna Sæmundssonar og Árna Friðrikssonar og fjölmörgum öðrum samstarfsmönnum á Hafrannsóknastofnuninni fyrir liðsinni þeirra við sýnatöku. Þá viljum við þakka Héðni Valdimarssyni fyrir að hafa gert sjófræðigögn aðgengileg og Hafsteini G. Guðfinnssyni fyrir að hafa leyft okkur að nota blaðgrænugögn. Þá viljum við þakka Ólafi S. Ástþórssyni og Ólafi K. Pálssyni fyrir yfirlestur handrits og margar góðar ábendingar. Loks þökkum við Stefáni Þór Þórssyni, en hann greindi hluta átusýnanna.

Heimildir

- Anon. 2010a. Nytjastofnar sjávar 2009/2010. Aflahorfur fiskveiðiárið 2010/2011. State of Marine Stocks in Icelandic Waters 2009/2010. Prospects for the Quota year 2010/2011. *Hafrannsóknir nr. 153*: 1-178 bls.
- Anon. 2010b. Þættir úr vistfræði sjávar 2009. Environmental Conditions in Icelandic Waters 2009. *Hafrannsóknir nr. 152*: 1-53.
- Auel, H. 1999. The ecology of Arctic deep-sea copepods (Euchaetidae and Aetideidae). Aspects of their distribution, trophodynamics and effect on the carbon flux. *Berichte zur Polarforschung* 319: 1-97.
- Árni Friðriksson 1944. Norðurlandssíldin. *Rit Fiskideildar* 1: 1-340.
- Ástþór Gíslason & Ólafur S. Ástþórsson 1995. Seasonal cycle of zooplankton southwest of Iceland. *Journal of Plankton Research* 17: 1959-1976.
- Ástþór Gíslason, Ólafur S. Ástþórsson 1998. Seasonal variations in biomass, abundance and composition of zooplankton in the sub-arctic waters north of Iceland. *Polar Biology* 20: 85-94.
- Ástþór Gíslason & Ólafur S. Ástþórsson 2004. Distribution patterns of zooplankton communities around Iceland in spring. *Sarsia* 89: 467-477.
- Ástþór Gíslason, Hildur Pétursdóttir, Ólafur S. Ástþórsson, Kristinn Guðmundsson & Héðinn Valdimarsson. 2009. Interannual variability in abundance and community structure of zooplankton south and north of Iceland in relation to environmental conditions in spring 1990-2007. *Journal of Plankton Research* 31: 541-551.
- Båmstedt, U. 1974. Biochemical studies on the deep-water pelagic community of Korsfjorden, western Norway. Methodology and sample design. *Sarsia* 56: 71-86
- Blachowiak-Samolyk, K. 2008. Contrasting zooplankton communities (Arctic vs. Atlantic) in the European Arctic Marginal Ice Zone. *Oceanologia* 50: 363-389.
- Brodsky, K. A. 1967. Calanoida of the far Eastern Seas and Polar Basin of the USSR. Keys to the fauna of the USSR. No 35, 440 bls., (þýdd úr rússnesku, Israel Prog. Sci; frumútgáfa gefin út 1950).
- Dalpadado, P., Borkner, N., Bogstad, B. & Mehl, S. 2001. Distribution of *Themisto* (Amphipoda) spp. in the Barents Sea and predator-prey interactions. *ICES Journal of Marine Science* 58: 867-895.
- Dalpadado, P., Ellertsen, B. & Johannessen, S. 2008. Inter-specific variations in distribution, abundance and reproduction strategies of krill and amphipods in the marginal ice zone of the Barents Sea. *Deep-Sea Research* 55: 2257-2265.
- Davis, C. S. 1984. Predatory control of copepod seasonal cycles on Georges Bank. *Marine Biology* 82: 31-40.
- Dunbar, M.J. 1964. *Serial atlas of the marine environment*. Folio 6. Euphausiids and pelagic amphipods. American Geographical Society, New York.
- Gallienne, C. P. & Robins, B. 2001. Is *Oithona* the most important copepod in the world's oceans? *Journal of Plankton Research* 23: 1421-1432.
- Hassel, A. 1986. Seasonal changes in zooplankton composition in the Barents Sea, with special attention to *Calanus* spp. (Copepoda). *Journal of Plankton Research* 8: 329-339.
- Héðinn Valdimarsson & Svend Aage Malmberg 1999. Near-surface circulation in Icelandic waters derived from satellite tracked drifters. *Rit Fiskideildar* 16: 23-39.
- Hildur Pétursdóttir 2012. Fæðuvistfræðileg tengsl algengra uppsjávartegunda í Íslandshafi. *Hafrannsóknir nr. 164*: 88-102.
- Hirche, H.-J. 1997. Life cycle of the copepod

- Calanus hyperboreus in the Greenland Sea. *Marine Biology* 128: 607-618.
- Hirche, H.-J., Hagen, W., Mumm, N. & Richter, C. 1994. The Northeast Water Polynya, Greenland Sea. III Meso- and macroplankton distribution and production of dominant herbivorous copepods during spring. *Polar Biology* 14: 491-503.
- Hirche, H.-J. & Kosobokova, K. 2003 Early reproduction and development of dominant calanoid copepods in the sea ice zone of the Barents Sea - need for a change of paradigms? *Marine Biology* 143: 769-781
- Hjálmar Vilhjálmsson 1994. The Icelandic capelin stock. Capelin *Mallotus villosus* (Muller) in the Iceland, Greenland, Jan Mayen area. *Rit Fiskideildar* 13(1): 281 bls.
- Hjálmar Vilhjálmsson 2002. Capelin (*Mallotus villosus*) in the Iceland–East Greenland–Jan Mayen ecosystem. *ICES Journal of Marine Science* 216: 870-883.
- Jespersen, P. 1940a. Non-parasitic Copepoda. *Zoology of Iceland* 3: 1-116.
- Jespersen, P. 1940b. Investigations on the quantity and distribution of zooplankton in Icelandic waters. *Meddelelser fra Kommissjonen for Danmarks Havundersøkelser*, (Serie Plankton) 3(5): 1-77.
- Kinne, O. 1970. Temperature, animals: invertebrates. Í *Marine ecology*, Vol 1. Environmental factors, Part 1. Ritstj. O. Kinne. Wiley-Interscience, London, bls. 407–514.
- Kinne, O. 1971. Salinity, animals: invertebrates. Í *Marine ecology*, Vol 1. Environmental factors, Part 2. Ritstj. O. Kinne. Wiley-Interscience, London, bls. 821–995.
- Krebs, C. 1989. *Ecological Methodology*. Harper Collins, New York.
- Longhurst, A. & Williams, R. 1992. Carbon flux by seasonal vertical migrant copepods is a small number. *Journal of Plankton Research* 11: 1495-1509.
- Mauchline, J. 1998. The biology of calanoid copepods. *Advances in Marine Biology* 33: 1-710.
- McLaren, I. A., Walker, D. A. & Corkett, C. J. 1968. Effects of salinity on mortality and development rate of eggs of the copepod *Pseudo-calanus minutus*. *Canadian Journal of Zoology* 46: 1267–1269.
- Melle, W. 2004. Zooplankton: The link to higher trophic levels. Í *The Norwegian Sea ecosystem*. Ritstj. H. R. Skjoldal, R. Sætre, A. Færnø, O. A. Misund, I. Röttingen. Academic Press, bls. 137-202.
- Mork, K. A. & Blindheim, J. 2000. Variations in the Atlantic inflow to the Nordic Seas, 1955-1996. *Deep-Sea Research* 47: 1035-1057.
- Motoda, S. 1959. Devices of simple plankton apparatus. *Memories of the Faculty of Fisheries*, Hokkaido University 7: 73-94.
- Norrbin, M. F., Olsen, R.-E. & Tande, K. S. 1990. Seasonal variation in lipid class and fatty acid compositions of two small copepods in Balsfjorden, northern Norway. *Marine Biology* 105: 205-211.
- Ólafur K. Pálsson 1974. Rannsóknir á fæðu fiskseiða við strendur Íslands. *Náttúrufræðingurinn* 44: 1-21.
- Ólafur K. Pálsson, Sveinn Sveinbjörnsson, Héðinn Valdimarsson, Ástþór Gíslason & Hjálmar Vilhjálmsson. 2012. Lífshættir loðnu í Íslandshafi. *Hafrannsóknir nr.* 164: 119-132.
- Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1992. Investigations on the ecology of the zooplankton community in Ísafjord-deep, northwest Iceland. *Sarsia* 77: 225-236.
- Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1995. Long term changes in zooplankton biomass in Icelandic waters in spring. *ICES Journal of Marine Science* 52: 657-668.
- Ólafur S. Ástþórsson, Ástþór Gíslason 1997a. On the food of capelin in the subarctic waters north of Iceland. *Sarsia* 82: 81-86.
- Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1997b. Biology of euphausiids in the sub-arctic waters north of Iceland. *Marine Biology* 129: 319-330.
- Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 2003. Seasonal variations in abundance, development and vertical distribution of *Calanus finmarchicus*, *C. hyperboreus* and *C. glacialis* in the East Icelandic Current. *Journal of Plankton Research* 25: 843-854.
- Ólafur S. Ástþórsson, Ástþór Gíslason & Guðmundur S. Jónsson 1995. Zooplankton biomass and composition in the western Iceland Sea during autumn. Extended Abstracts Volume from a Symposium on Nordic Seas, Hamburg. Arctic Ocean Science Board and Sonderforschungsbereich „Processes relevant to climate, 21-24.
- Ólafur S. Ástþórsson, Ingvar Hallgrímsson & Guðmundur S. Jónsson 1983. Variations in zooplankton densities in Icelandic waters in spring during the years 1961-1982. *Rit Fiskideildar* 7: 73-113.
- Paulsen, O. 1906. Studies on the biology of

- Calanus finmarchicus in the waters round Iceland. *Meddelelser fra Kommissjonen for Havundersøkelser*, (Serie Plankton) 1(4): 1-21.
- Planque, B. & Fromentin, J.-M. 1996. Calanus and environment in the eastern North Atlantic. I. Spatial and temporal patterns of *C. finmarchicus* and *C. helgolandicus*. *Marine Ecology Progress Series* 134: 101-109.
- Richter, C. 1994. Regional and seasonal variability in the vertical distribution of mesozooplankton in the Greenland Sea. *Berichte zur Polarforschung* 154: 1-87.
- Sabatini, M. & Kiørboe, T. 1994. Egg production, growth and development of the cyclopoid copepod *Oithona similis*. *Journal of Plankton Research* 16: 1329-1351.
- Sakshaug, E. 1997. Biomass and productivity distributions and their variability in the Barents Sea. *ICES Journal of Marine Science* 54: 341-350.
- Siegel, V. & Nicol, S. 2000. Population parameters. Í: Everson, I. (ritstj.), *Krill Biology, Ecology and Fisheries*. Blackwell Science Publication, UK 99: 103-149.
- Skjoldal, H. R., Dalpadado, P & Dommasnes, A. 2004. Food web and trophic interactions. Í *The Norwegian Sea ecosystem*. Ritstj. H. R. Skjoldal, R. Sætre, A. Færnø, O. A. Misund, I. Röttingen. Tapir Academic Press, s. 447-506.
- Svensen, C. & Kiørboe, T. 2000. Remote prey detection in *Oithona similis*: hydromechanical versus chemical cues. *Journal of Plankton Research* 22: 1155-1166.
- Tande, K.S. 1991. Calanus in North Norwegian fjords and in the Barents Sea. *Polar Research* 10: 389-407.
- ter Braak, C. J. F. & Verdonschot, P. F. M. 1995. Canonical correspondence analysis and related multivariate methods in aquatic ecology. *Aquatic Science* 57: 255-289.
- ter Braak, C. J. F. & Smilauer, P. 2002. CANOCO Reference manual and CanoDraw for Windows User's guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5). Microcomputer Power (Ithaca, NY, USA), 500 bls.
- Unnsteinn Stefánson, Jón Ólafsson 1991. Nutrients and fertility of Icelandic waters. *Rit Fiskideildar* 7: 1-56.
- Unnsteinn Stefánsson 1962. North Icelandic Waters. *Rit Fiskideildar* 3: 1-269.
- Unnsteinn Stefánsson 1999. *Hafið*, Háskólaútgáfan, 480 bls.
- Unnsteinn Stefánsson & Jakob Jakobsson 1989. Oceanographical variations in the Iceland Sea and their impact on biological conditions, a brief review. Í *Proceedings of the sixth conference of the Comité Arctique International*, 13-15 May 1985. Ritstj. L. Rey, V. Alexander. E.J. Brill, Leiden, bls. 427-455.
- Werner, I., Auel, H., Garrity, C., & Hagen, W. 1999. Pelagic occurrence of the sympagic amphipod *Gammarus wilkitzkii* in ice-free waters of the Greenland Sea – dead end or part of the life cycle? *Polar Biology* 22: 56-60.
- With, C. 1915. Copepoda I. Calanoida Amp-hascandria. *Den Danske Ingolf Expedition* 3 (4): 1-270.
- Þórunn Þórðardóttir 1977. Primary production in North Icelandic waters in relation to recent climatic changes. Í *Polar Oceans*. Proceedings of the polar oceans conference held at McGill University, Montreal, May 1974. Ritstj. M. J. Dunbar. Arctic Institute of America, Canada, bls. 655-665.
- Þórunn Þórðardóttir 1984. Primary production north of Iceland in relation to water masses in May-June 1970-1980. *ICES C.M. L:20*: 1-17.
- Österhus, S. & Gammelsrod, T. 1999. The abyss of the Nordic seas is warming. *Journal of Climate* 12: 3297-3304.

Fæðuvistfræðileg tengsl algengra uppsjávartegunda í Íslandshafi

Hildur Pétursdóttir

Hafrannsóknastofnunin

Ágrip

Hildur Pétursdóttir 2012. *Fæðuvistfræðileg tengsl algengra uppsjávartegunda í Íslandshafi. Hafrannsóknir nr. 164.* Fæðuvistfræðileg rannsókn var gerð á uppsjávurvistkerfinu í Íslandshafi í ágúst 2007 og 2008. Mælt var hlutfall stöðugra samsæta kolefnis og köfnunarefnis ($\delta^{13}\text{C}$ og $\delta^{15}\text{N}$), fitusýrur og fitualkóhól. Markmið rannsóknarinnar var að kanna fæðuvistfræðileg tengsl og stöðu mikilvægra uppsjávartegunda, þ.e. þörungna, algengra tegunda dýrasvifs og fiska, með aðaláherslu á fæðuvistfræði loðnu (*Mallotus villosus*). Uppsjávurvistkerfið í Íslandshafi spannar um fjögur fæðuþrep, að fuglum og spendýrum frátöldum. Jurtaetan og krabbablóin póllata (*Calanus hyperboreus*) tilheyrir lægsta fæðuþrepi í máí (hér sett sem 2,0) af þeim dýrategundum sem rannsakaðar voru og fullvaxin loðna og kolmunni (*Micromesistius poutassou*) því hæsta (~3,6). *Calanus* tegundir eru mjög mikilvæg fæða hjá flestum þeirra tegunda sem rannsakaðar voru. Undantekningar eru ljósáturnar augnsili (*Thysanoessa inermis*) og sporðkríli (*T. longicaudata*) en *Calanus* tegundir reyndust óverulegur hluti af fæðu þeirra. Pilormurinn *Eukrohnia hamata* er kjötæta og eru *Calanus* tegundir mikilvægar í fæðunni, á meðan flestar hinar dýrasvifstegundirnar eru blandaðar al- og kjötætur. Ljósátulirfur eru mikilvægar í fæðu loðnulirfa. Kaldsjávarmarflóin *Themisto libellula* reyndist mikilvæg fæða full-orðinnar loðnu. Mikilvægi *Calanus* tegunda, bæði beint og óbeint (gegnum stærri dýrasvifstegundir) eykst með stærð loðnunnar. Fullvaxin loðna og kolmunni hafa svipað fæðuval og gætu því verið í samkeppni um fæðu.

Abstract

Hildur Petursdottir 2012. *Trophic relationships of abundant pelagic species in the Iceland Sea. Marine Research in Iceland no. 164.* A trophic study was carried out in August 2007 and 2008 on the pelagic ecosystem in the sub-arctic Iceland Sea, north of Iceland. Carbon and nitrogen stable isotopes and fatty acid biomarkers were used to study trophic linkages and trophic ecology of the most important pelagic species in this ecosystem with special emphasis on capelin (*Mallotus villosus*). According to ^{15}N enrichment it is concluded that there are 3-4 trophic levels in this pelagic ecosystem, excluding birds and mammals. The primarily herbivorous copepod *Calanus hyperboreus* occupies the lowest trophic level of the animal species studied but adults

of capelin and blue whiting (*Micromesistius poutassou*) the highest. *Calanus* spp. proved to be an important diet component of most of the studied species. The euphausiid species, *Thysanoessa inermis* and *T. longicaudata*, however, are exceptions as *Calanus* spp. are of minor importance in their diet. The chaetognath, *Eukrohnia hamata*, is a pure carnivore, feeding heavily on *Calanus* spp., while most of the other zooplankton species studied, practice omnivorous-carnivorous feeding mode. Young euphausiids are important food component for capelin larvae. The amphipod species, *Themisto libellula*, is important in the diet of adult capelin. The importance of *Calanus* spp. or *Calanus* derived diet increases with the size of capelin. Adults of capelin and blue whiting share the same feeding habits and could therefore be competing for food.

Inngangur

Skarpar árstíðabreytingar eru einkennandi fyrir vistkerfi á norðlægum breiddargráðum, mikil aukning á birtu yfir stuttan tíma á vorin og sumrin og síðan dimmir langir vetur, sem fyrir vikið leiðir af sér mikla frumframleiðni og framleiðslu á dýrasvifi yfir tiltölulega stuttan tíma (Falk-Petersen o.fl. 1990, Þórunn Þórðardóttir 1994, Ástþór Gíslason & Ólafur Ástþórsson 1998). Uppsjár lífverur í vistkerfum á háum breiddargráðum hafa aðlagast þessu stutta framleiðnitímabili með því að safna og geyma mikið magn af umframfæðu sem forðafitu, og gerir það lífverunum kleift að lifa af löng tímabil þegar litla sem enga fæðu er að fá (Falk-Petersen 1981, Clarke 1983, Hagen & Auel 2001).

Íslandshaf er fæðu- og uppeldisslóð margra mikilvægra íslenskra fiskstofna (Kjartan G. Magnússon & Ólafur K. Pálsson 1989, Ólafur Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1997, Ólafur K. Pálsson 1997), þar á meðal loðnu (*Mallotus villosus*), en loðnuafli hefur nokkrum sinnum verið meiri en ein milljón tonna á ári (Anon 2005, Ólafur Ástþórsson o.fl. 2007). Loðnan leikur stórt hlutverk í samspili lífveranna í vistkerfi Íslandshafs og er tengiliður á milli dýrasvifs (fæðu loðnunnar) og lífvera á hærri fæðuþrepum, þar sem loðnan er mikilvæg fæða fyrir margar tegundir fiska, fugla og spendýra (Kjartan G. Magnússon & Ólafur K. Pálsson

1989, Hjálmar Vilhjálmsson 1994, Jón Sólmundsson 2007). Til að mynda er hún langmikilvægasta fæða fullorðins þorsks (*Gadus morhua*, Kjartan G. Magnússon & Ólafur K. Pálsson 1989). Göngur loðnunnar úr Íslandshafi, þar sem hún étur mikið af fituríku dýrasvifi, leiða því til stórfellds orkuflutnings yfir á íslenska landgrunnssvæðið og hrygningarstöðvar fyrir sunnan og vestan land (Hjálmar Vilhjálmsson 1994, Ólafur Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1997, Ólafur Ástþórsson o.fl. 2007). Krabbaflær eru ríkjandi í samfélagi dýrasvifsins í Íslandshafi og er rauðátan (*Calanus finmarchicus*) ein algengasta tegundin og stór hluti af lífmassa dýrasvifsins. Aðrar algengar dýrasvifstegundir í Íslandshafi eru krabbaflærnar *Oithona* spp., *Pseudocalanus* spp., *Metridia longa* og póláta (*C. hyperboreus*) en tvær síðast nefndu finnast aðallega í arktíska sjónum í miðju og vestanverðu Íslandshafi. Ljósátutegundirnar augnsíli (*Thysanoessa inermis*), sporðkrili (*T. longicaudata*) og náttlampi (*Meganyctiphanes norvegica*) og marflærnar *Themisto abyssorum* og *T. libellula* eru einnig algengar, en síðast nefnda tegundin finnst aðallega í arktískum sjó (Ólafur Ástþórsson o.fl. 1995, Dalpadado o.fl. 1998, Ástþór Gíslason & Ólafur Ástþórsson 1998).

Til að skilja fæðutengsl lífvera og orkuflutning um vistkerfið er nauðsynlegt að þekkja samspil afræningja og bráðar. Hefðbundin aðferð til að meta fæðu lífvera er að greina magainnihald þeirra, en sú aðferð er bæði tímafrek og gefur einungis upplýsingar um síðustu máltíð. Nýstárlegri aðferðir við að meta fæðutengsl eru fölgarnar í því að kanna fitusýrusamsetningu lífvera og mæla stöðugar samsætur kolefnis og köfnunarefnis ($\delta^{13}\text{C}$ og $\delta^{15}\text{N}$), og hafa þær reynst öflug viðbót við hefðbundnar aðferðir. Fitusýruinnihaldið segir að einhverju leyti til um fæðu á undanförunum vikum og mánuðum, en stöðugar samsætur segja til um fæðuvistfræðilega stöðu, þ.e. á hvaða þrepi fæðuvefsins viðkomandi lífvera er (Hobson o.fl. 1995, Kharlamenko o.fl. 2001, Dahl o.fl. 2003, Hildur Pétursdóttir o.fl. 2008, 2010). Þessar aðferðir hafa því þann kost, fram yfir hefðbundin magasýni, að veita mikilvægar upplýsingar um „fæðusögu“, þ.e. fæðunám yfir lengri tíma (Fry 1988, Rau o.fl. 1992, Dalsgaard o.fl. 2003).

Mæligildi stöðugra samsæta kolefnis og köfnunarefnis fara hækkandi frá bráð til afræningja (Minagawa & Wada 1984, Hobson

o.fl. 1995). Hækkun á milli fæðuþrepa er meiri á $\delta^{15}\text{N}$ heldur en $\delta^{13}\text{C}$. Því eru $\delta^{15}\text{N}$ -gildi góður mælikvarði á fæðustöðu tegundanna (Hobson & Welch 1992, Dahl o.fl. 2003, Tamelander o.fl. 2006). Á hinn bóginn geta $\delta^{13}\text{C}$ gildi gefið vísendingar um uppruna kolefnis í fæðuvefnum (Peterson & Fry 1987, Hecky & Hesslein 1995, Peterson 1999, Søreide o.fl. 2006).

Fitur í vistkerfi sjávar hafa verið notaðar sem svokallaðir lífvísar (e. biomarker) til að greina orkuflæði og fæðutengsl lífvera (Falk-Petersen o.fl. 1990, 2004, Dalsgaard o.fl. 2003). Hópar frumframleiðenda og nokkrar dýrasvifstegundir hafa sína einstöku fitusýrusamsetningu (Dalsgaard o.fl. 2003). Þekkt er að kísilþörungar hafa hlutfallslega hátt magn af 20:5n3, 16:1n7 og C16 fjölómettuðum fitusýrum (FFS) og að fitusýrurnar 22:6n3 og C18 FFS eru í miklu magni í svipuþörungum og *Phaeocystis*. *Calanus* krabbaflær mynda sínar eigin, einkennandi fitusýrur og fitualkóhól, 20:1n9 og 22:1n11, en þær kolefniskeðjur eru langar og orkuríkar. Allar þessar fitusýrur eru taldar góðir fitusýrufæðuvísar (e. fatty acid trophic markers, Tafla 1), þar sem þær flytjast nær óbreyttar upp eftir fæðuvefnum (Lee o.fl. 1971b, Graeve o.fl. 1994, Dalsgaard o.fl. 2003). Fjölbáttagreiningar hafa verið notaðar með góðum árangri í fæðurannsóknum til að bera saman fitusýrusamsetningu mismunandi tegunda (Grahl-Nielsen & Mjaavatten 1991, Falk-Petersen o.fl. 2004) og þeim verður því beitt hér.

Upplýsingar um fæðutengsl uppsjávarlífvera í Íslandshafi eru af skornum skammti. Rannsóknir voru gerðar á fæðu loðnu með því greina magainnihald (Þorsteinn Sigurðsson & Ólafur Ástþórsson 1991, Ólafur Ástþórsson &

Tafla 1. Dæmi um nokkra þekktu fitusýru-fæðuvísar (fatty acid trophic markers) (Dalsgaard o.fl. 2003).

Table 1. Some known fatty acid trophic markers (Dalsgaard et al. 2003).

Fæðuvísar	Flokkunareining
22:6n3 og C18 FFS	Svipuþörungar
18:4n3, 18:5n3, 18:2n6	<i>Phaeocystis pouchetti</i>
20:5n3, C16 FFS, 16:1n7	Kísilþörungar
20:1n9, 22:1n11	<i>Calanus</i> krabbaflær

Ástþór Gíslason 1997) en engar upplýsingar eru til um fæðu lífvera á lægri fæðuþrepum, þ.e. dýrasvifsins. Markmið þessarar rannsóknar var að skoða fæðuvistfræðilega byggingu og tengsl uppsjávarsamfélagsins í Íslandshafi árin 2007 og 2008 með því að mæla hlutfall stöðugra samsæta kolefnis og köfnunarefnis ($\delta^{13}\text{C}$ og $\delta^{15}\text{N}$) og fitusýrur og fitualkóhól í plöntu- og dýrahópum. Áhersla var lögð á fæðu loðnunnar, bæði lirfa og eldri loðnu. Rannsókn þessi er hluti af viðameiri rannsóknum Hafrannsóknastofnunarinnar á vistkerfi Íslandshafs.

Efniviður og aðferðir

Í þessari grein er gefin gróf heildarmynd af uppsjávarvistkerfinu í Íslandshafi og helstu niðurstöður kynntar. Þar sem almennt var lítil breytileiki á milli stöðva og ára á sambærilegum sýnum, var einstaklingum sömu tegundar af svipaðri lengd/þroskastigi og sama árstíma þessi tvö ár steipt saman í töflum, en hvert sýni var þó meðhöndlað sem eining við fjölþáttgreiningar. Einungis voru skoðuð sýni sem safnað var í ágúst, þegar lang yfirgripsmesta söfnunin fór fram, en þar fyrir utan voru *Calanus* tegundirnar einnig rannsakaðar á öðrum árstímum. Við frekari úrvinnslu er þó stefnt að því að rýna betur í mun á milli stöðva og ára í tengslum við ýmsar umhverfisbreytur og samfélagsgerð lífveranna og einnig verður skoðaður árstíðabundinn munur á fæðutengslum *Calanus* tegundanna.

Söfnun og sýnavinnsla á sjó

Sýnum var safnað á 36 stöðvum, með mismunandi veiðarfærum (WP-háf, Multinet-háf, Tucker-háf og flotvörpu) í fjórum leiðongrum árin 2007 og 2008 (Töflur 2 og 3). Átján algengum uppsjávartegundum/tegundahópum var safnað, þ.e. svifþörungum, 12 dýrasvifstegundum og 5 fisktegundum, á mismunandi þroskastigum/aldri (Tafla 3).

Til að fá hugmynd um gildi svifþörunga var agnabundnu lífrænu efni (Particulate Organic Matter, POM) safnað með því að sía sjó úr sírennsliskerfi skipsins, en sjóinntakið er á 5 metra dýpi. Fyrir samsætumælingar voru 4 lítrar af sjó síaðir í gegnum GF/G Whatman síur (sem búið var að brenna við 450°C í 4 klst), til að fá að lágmarki 1mg sýnis (þurrvigti). Síurnar voru síðan geymdar í frysti (-20°C) fram að mælingu. Fyrir fitusýrumælingar á POM voru síurnar hins vegar vættar í klóróform:metanól (2:1, v/v) lausn áður en síun fór fram en sía þurfti um 20

lítra af sjó. Sýnin voru síðan fryst í klóróform:metanól lausn.

Svifdýrin og fiskarnir voru tegundagreind og ákveðinn fjöldi einstaklinga af hverri tegund, og lengd/þroskastigi í sumum tilfellum, tekinn frá til mælinga, bæði fyrir samsætu- og fitusýrumælingar (Tafla 3). Fyrir greiningar á fitusýrum voru dýrin geymd í klóróform:metanól lausn við -20°C, fyrir utan fullorðna fiska sem voru heilfrystir og síðan undirbúnir frekar til mælinga í landi, þ.e. loðnan var maukuð og hlutsýni notuð en eingöngu voru tekin vöðvasýni af kolmunna. Sýnin voru síðan geymd í klóróform:metanól lausn við -80°C. Sýni fyrir samsætumælingar voru fryst ómeðhöndluð í álbökkum (-20°C). Þrjú hlutsýni voru mæld úr hverju sýni (Tafla 3). Í landi voru sýnin síðan geymd við -80°C uns mælingar voru gerðar á rannsóknastofu.

Mælingar á rannsóknastofu

Stöðugar samsætur: Svifdýr og fiskaungviði voru greind í heilu lagi, en vöðvasýni úr fullorðnum fiskum. Sýnin voru þurrkuð við 60-70°C og maukuð í agate morteli með agatestaut. Í samræmi við framkvæmdalýsingu frá Institut for energiteknikk (IFE), í Kjeller í Noregi, var fitan dregin úr sýnunum með Soxhlet útdrætti (sjá; t.d. Dahl o.fl. 2003) í 2 klst með 93% diklórómethane og 7% metanóli, en það er gert til að minnka breytileikann sem verður vegna léttari fitusamsætunnar (Hobson & Welch 1992). Til að losna við leifar af karbónati voru sýnin sýruhreinsuð með 2N HCl og þurrkuð við 80°C. Hlutfall stöðugra samsæta í efninu sem eftir er, var síðan greint með sérstökum massagreini (Micromass Optima, Isotope Ratio Mass Spectrometer) og táknað sem hækkun í þúsundustuhlutum (‰) miðað við alþjóðastaðal samkvæmt eftirfarandi sambandi:

$$\delta X = [(R_{\text{sýni}}/R_{\text{staðall}}) - 1] \times 1000$$

þar sem δX (‰) táknar ^{13}C eða ^{15}N og R er tilsvareandi hlutfall $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ eða $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$. Staðall fyrir $\delta^{13}\text{C}$ er Pee Dee Belemnite (PDB: USGS 24) og fyrir $\delta^{15}\text{N}$ andrúmsloft (IAEA-N-1 og IAEA-N-2).

Fitusýrur og fitualkóhól: Fituhópar, fitusýrur og fitualkóhól voru greind á UNILAB, í Tromsø, Noregi. Sýnin voru mulin í klóróform:metanól 2:1 (v/v) lausn og heildarfitan dregin út og vegin. Skautuðu og hlutlausu þættir fitunnar úr hlutsýni voru síðan aðskildir með útdrætti á súlu (Kaluzny o.fl. 1985). Hlutlausu

Tafla 2. Yfirlit yfir leiðangra og stöðvar í Íslandshafi þar sem sýnum var safnað árin 2007 og 2008
 Table 2. Overview of the cruises and stations sampled in the Iceland Sea 2007 and 2008.

Leiðangur	Stöðvanr.	Lengd (°N)	Breidd (°W)	Dagsetning	Ár
B6-07	309	67°45′	12°58′	19 apríl	2007
B8-07	392	67°27′	11°22′	22. maí	2007
B11-07	651	67°59′	18°50′	13. ágúst	2007
B11-07	652	67°42′	18°50′	13. ágúst	2007
B11-07	693	68°00′	12°40′	18. ágúst	2007
B11-07	704	68°25′	17°32′	19. ágúst	2007
B11-07	706	68°21′	18°37′	19. ágúst	2007
B11-07	709	69°00′	18°50′	20. ágúst	2007
B11-07	710	69°00′	18°20′	20. ágúst	2007
B11-07	721	69°00′	11°32′	21. ágúst	2007
B11-07	731	70°00′	14°14′	22. ágúst	2007
B11-07	738	70°00′	18°48′		2007
B11-07	748	69°24′	20°24′		2007
B11-07	752	69°00′	20°12′		2007
B11-07	757	69°00′	23°25′		2007
B11-07	758	69°00′	23°28′		2007
B11-07	767	68°07′	21°17′		2007
A11-08	344	68°00′	12°40′	12. ágúst	2008
A11-08	354	68°00′	18°16′	13. ágúst	2008
A11-08	355	68°00′	18°21′	13. ágúst	2008
A11-08	363	68°00′	22°40′	13. ágúst	2008
A11-08	364	68°00′	22°59′	13. ágúst	2008
A11-08	369	68°27′	20°48′	14. ágúst	2008
A11-08	370	68°30′	20°00′	14. ágúst	2008
A11-08	385	69°00′	12°15′	16. ágúst	2008
A11-08	391	70°00′	13°00′	16. ágúst	2008
A11-08	393	70°00′	15°14′	17. ágúst	2008
A11-08	396	69°35′	18°30′	17. ágúst	2008
A11-08	398	68°34′	19°26′	18. ágúst	2008
A11-08	409	66°39′	20°18′	19. ágúst	2008
A11-08	414	67°30′	20°14′	20. ágúst	2008
A11-08	420	71°00′	17°30′	21. ágúst	2008
A11-08	443	72°00′	11°19′	23. ágúst	2008
A11-08	473	69°00′	23°28′	27. ágúst	2008
A11-08	490	67°43′	30°16′	29. ágúst	2008
A11-08	493	66°50′	30°44′	30. ágúst	2008
A11-08	498	67°30′	26°23′	31. ágúst	2008
A11-08	505	67°00′	26°40′	1. september	2008
A11-08	506	67°08′	26°32′	1. september	2008

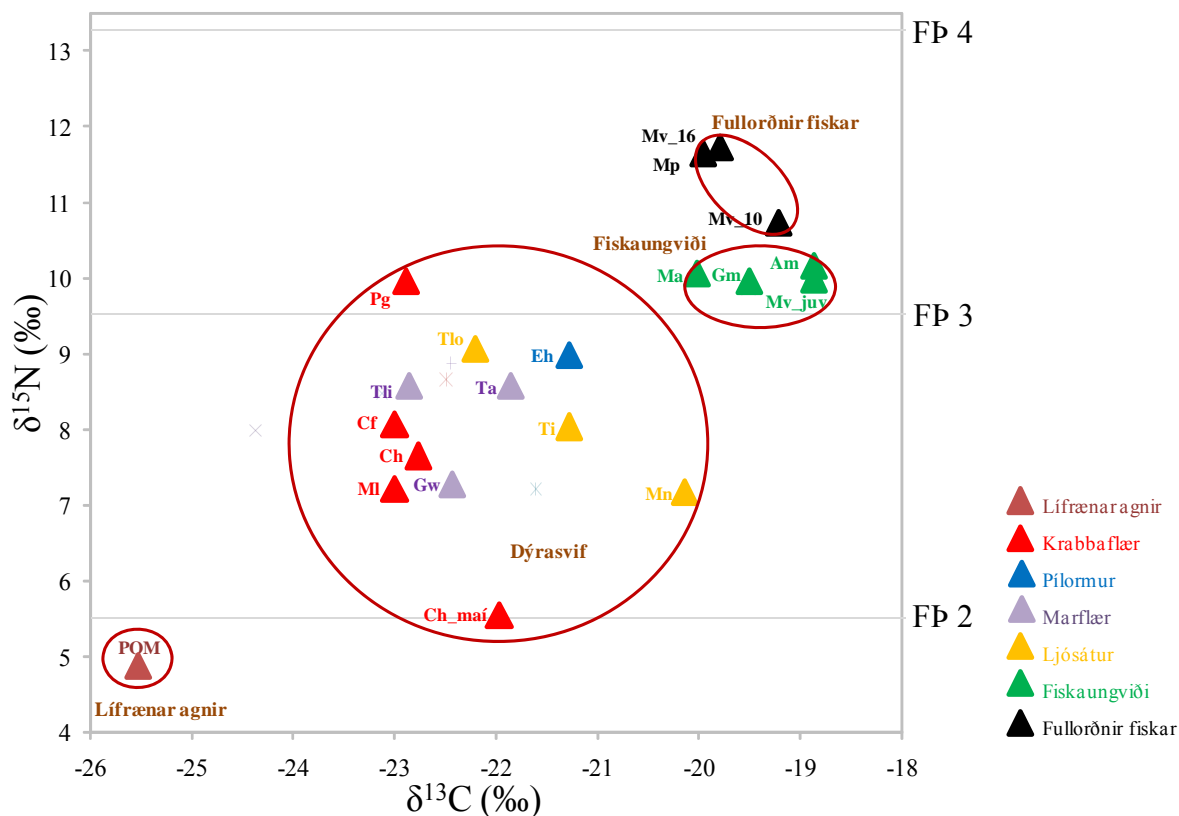
fitan er orkuforði dýranna og hér var áfram unnið með hana eingöngu. Þekkt magn af fitusýrunni 21:0 var bætt við fituna sem innri staðli og sýruhvötuð transestermyndun var gerð með 1% brennisteinssýru í metanóli (Christie 1982). Hlutfallslegt magn (%) af fitusýrumethylester og fitualkóhólacetati, sem fékkst á þennan hátt, var síðan ákvarðað með gaskrómatógrafíu

(Agilent 6890 N). Vetni var notað sem burðargas og hitahækkun var í upphafi 30°C min⁻¹ (frá 60 – 150°C), síðan var hitahækkun 1,5°C min⁻¹ þar til lokahitastigi 230°C var náð. Borin voru kennsl á hverja fitusýru og fitualkóhól með því að bera þau saman við þekkta staðla og magn metið með því að nota HPChemStation hugbúnað.

Tegundir/hópur	Lengd/stig (cm)	Stöð no.	Söfnunartæki	Dýpi (m)	Greining		
					Fitur	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{15}\text{N}$
POM & KRABBAFLÆR							
POM							
		392	Vatns inntak	0-50	3(filter)	1(filter)	1(filter)
		731	Vatns inntak	5	2(filter)	1(filter)	1(filter)
<i>Calanus finmarchicus</i>	CV	309	Bongo	0-100	2(-10)	1(110)	1(110)
		392	WP2	0-50	3(-10)	1(100)	1(100)
		693	Multinet	0-600	3(-12)	1(120)	1(120)
		709	Multinet	0-400	3(12)	1(100)	1(100)
		344	Tucker	0-100	3(15)	3(100)	3(100)
		354	Tucker	0-100	3(15)	3(80)	3(80)
		505	WP2	0-100	2(15)	1(80)	1(80)
	female	392	WP2	0-50	2(-10)	n.a.	n.a.
<i>Calanus hyperboreus</i>	CIV	420	Tucker	0-100	3(15)	3(100)	3(100)
	CV	309	Bongo	0-100	2(6)	n.a.	n.a.
		392	WP2	0-50	3(-5)	n.a.	n.a.
	female	309	Bongo	0-100	3(5)	3(15)	3(15)
		392	WP2	0-50	3(-5)	3(15)	3(15)
		693	Multinet	0-600	3(10)	1(15)	1(15)
<i>Metridia longa</i>	female	709	Multinet	0-400	3(12)	2(70)	2(70)
		391	WP2	0-100	3(15)	3(80)	3(80)
<i>Paraeuchaeta glacialis</i>	female	710	Tucker	0-100	3(5)	3(20)	3(20)
HVELJUR							
<i>Aglantha digitale</i>	0.5	354	Tucker	0-100	n.a.	1(100)	1(100)
LJÓSÁTUR							
<i>Thysanoessa inermis</i>	2.5	651	Tucker	0-100	3(3)	3(4)	3(4)
	2.5	364	Tucker	0-100	3(3)	3(1)	3(1)
<i>Thysanoessa longicaudata</i>	1-1.5	710	Tucker	0-100	3(10)	3(20)	3(20)
	0.65	354	Tucker	0-100	3(15)	3(40)	3(40)
<i>Meganyctiphanes norvegica</i>	3-3.5	710	Tucker	0-100	3(3)	3(5)	3(5)
	3-4	363	Flottroll	17-20	3(3)	3(3)	3(3)
	4	490	Flottroll	216-218	3(3)	3(3)	3(3)
	4	490	Flottroll	216-218	3(3)	3(3)	3(3)
	4	490	Flottroll	216-218	3(3)	3(3)	3(3)
MARFLÆR							
<i>Themisto libellula</i>	1-1.5	710	Tucker	0-100	3(3)	3(20)	3(20)
	4-4.5	752	Flottroll	0-200	3(3)	3(2)	3(2)
	3-4	363	Flottroll	17-20	3(3)	3(3)	3(3)
	0.7	370	Tucker	0-100	3(3)	1(8)	1(8)
	3-4	420	Tucker	0-100	2(2)	3(1)	3(1)
	0.5-1.2	443	Tucker	0-100	3(3)	2(3)	2(3)
<i>Themisto abyssorum</i>	1.2-1.5	710	Tucker	0-100	3(3)	3(20)	3(20)
	0.35	385	Tucker	0-100	3(15)	3(45)	3(45)
<i>Gammarus wilkitzkii</i>	2.5	651	Tucker	0-100	3(1)	3(2)	3(2)
	4	396	Flottroll	7-13	3(3)	3(3)	3(3)
	4	396	Flottroll	7-13	3(3)	3(3)	3(3)
PÍLORMAR							
<i>Eukrohnia hamata</i>	3	693	Multinet	0-600	3(10)	3(15)	3(15)
	2.5-3	393	Tucker	0-100	3(10)	3(30)	3(30)
	2.5-3	393	Tucker	0-100	3(10)	3(30)	3(30)
FISKAR							
<i>Mallotus villosus</i>	4-5	652	Flottroll	0-26	3(5)	3(5)	3(5)
	13-14.5	652	Flottroll	0-26	2(1)	3(M)	3(M)
	6	706	Flottroll	n.a.	3(3)	3(7)	3(7)
	14-15	738	Flottroll	n.a.	3(1)	3(M)	3(M)
	15.5-16	748	Flottroll	n.a.	3(1)	3(M)	3(M)
	13-14.5	757	Flottroll	n.a.	3(1)	3(M)	3(M)
	14-16	758	Flottroll	n.a.	3(1)	3(M)	3(M)
	6-7.5	767	Flottroll	n.a.	3(3)	3(5)	3(5)
	5	369	Flottroll	18-20	3(3)	4(3)	4(3)
	6	398	Flottroll	15	3(2)	3(3M)	3(3M)
	10.5	414	Flottroll	17-20	3(1)	3(M)	3(M)
	15-17	473	Flottroll	270-300	3(1)	3(M)	3(M)
	5.5	498	Flottroll	20-40	3(3)	3(2M)	3(2M)
	11-13	506	Flottroll	70	3(1)	3(M)	3(M)
	15-16	506	Flottroll	70	3(1)	3(M)	3(M)
<i>Gadus morhua</i>	5-5.5	704	Flottroll	21	3(1)	3(1)	3(1)
	5.5	355	Flottroll	15	3(1)	3(M)	3(M)
	6	493	Flottroll	36-50	3(1)	3(M)	3(M)
	4.5	493	Flottroll	36-50	3(1)	3(3)	3(3)
<i>Melanogrammus aeglefinus</i>	6.5-7.5	355	Flottroll	15	3(1)	3(M)	3(M)
<i>Ammodytes marinus</i>	8.5	409	Flottroll	50-100	3(5)	3(3)	3(3)
<i>Micromesistius poutassou</i>	30	721	Flottroll	n.a.	3(1)	3(M)+3(L)	3(M)+3(L)

Tafla 3. Yfirlit yfir sýni þar sem greindar voru fitur (fitusýrur og fitualkóhól) og stöðugar samsætur ($\delta^{13}\text{C}$ og $\delta^{15}\text{N}$). Einnig eru sýnd stöðvanúmer, söfnunartæki og söfnunardýpi, fjöldi endurtekninga og fjöldi dýra í hverri endurtekningu (í sviga).

Table 3. Overview of samples for lipids (fatty acid and alcohol composition) and stable isotopes ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) analyzed as well as station number, gear and depth of sampling. The number of replicates analyzed and animals per replica (in brackets) are also given. Svigi: ef tala er í sviganum eru heil dýr greind



1. mynd. Fæðutengsl í Íslandshafi í ágúst 2007 og 2008. Stöðugar samsætur fyrir kolefni og köfnunarefni ($\delta^{13}\text{C}$ og $\delta^{15}\text{N}$) hjá öllum tegundunum. Gildin tákna meðaltöl og FP tákna reiknað fæðuprep. Nafnagiftir: Cf: *C. finmarchicus*; Ch: *C. hyperboreus*; Ml: *M. longa*; Pg: *P. glacialis*; Ti: *T. inermis*; Tlo: *T. longicaudata*; Mn: *M. norvegica*; Tl: *T. libellula*, Tl_1: 1 cm, Tl_4: 4 cm; Ta: *T. abyssorum*; Gw: *G. wilkitzkii*; Eh: *E. hamata*; Gm: *G. morhua*; Ma: *M. aeglefinus*; Mv: *M. villosus*, Mv_juv: larvur og seiði, Mv_10: 10 cm, Mv_16: 16 cm, Mv_ad: fullorðin loðna (11-16 cm); Mp: *M. poutassou*; Am: *A. marinus*.

Figure 1. Trophic relationships in the Iceland Sea in August 2007 and 2008. Stable isotopes of carbon and nitrogen ($\delta^{13}\text{C}$ og $\delta^{15}\text{N}$) for all the species. Values are means and the FP indicates trophic levels. Denomination: Cf: *C. finmarchicus*; Ch: *C. hyperboreus*; Ml: *M. longa*; Pg: *P. glacialis*; Ti: *T. inermis*; Tlo: *T. longicaudata*; Mn: *M. norvegica*; Tl: *T. libellula*, Tl_1: 1 cm, Tl_4: 4 cm; Ta: *T. abyssorum*; Gw: *G. wilkitzkii*; Eh: *E. hamata*; Gm: *G. morhua*; Ma: *M. aeglefinus*; Mv: *M. villosus*, Mv_juv: larvae and juvenile, Mv_10: 10 cm, Mv_16: 16 cm, Mv_ad: adult (11-16 cm); Mp: *M. poutassou*; Am: *A. marinus*.

Greining gagna

Til aðstoðar við túlkun gagna voru notaðir eftirfarandi hækkunarstuðlar fyrir samsætur: 0,8‰ fyrir $\delta^{13}\text{C}$ og 3,8‰ fyrir $\delta^{15}\text{N}$ á milli fæðuprepa. Eldri fæðurannsóknir hafa notað hækkunarstuðla á milli 0,4 og 1‰ fyrir $\delta^{13}\text{C}$ (DeNiro & Epstein 1978, Post 2002) og á milli 3 og 4‰ fyrir $\delta^{15}\text{N}$ (DeNiro & Epstein 1981, Minagawa & Wada 1984, Hobson & Welch 1992). Í þessari rannsókn var gert ráð fyrir að póláta í maí sýnum væri aðallega jurtaæta (Harris 1996, Søreide o.fl. 2008) og köfnunarefnisgildi hennar því notað til að ákvarða fæðuprep 2,0.

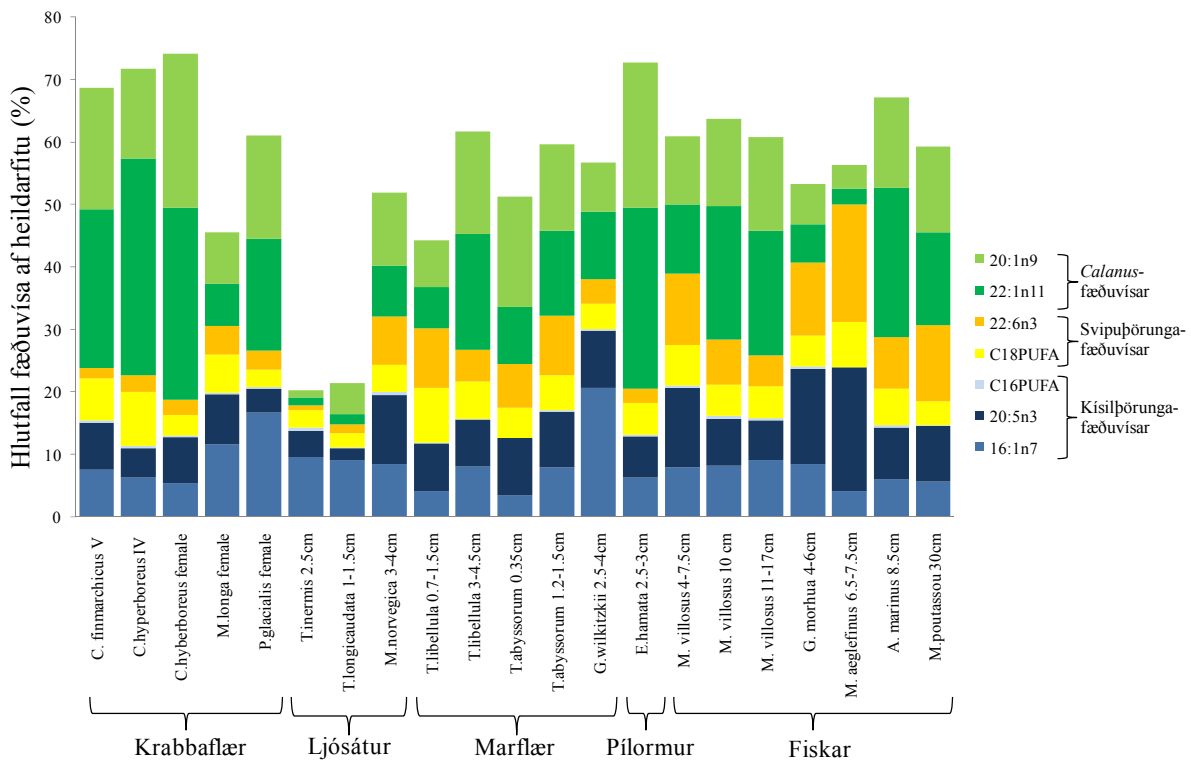
Eftirfarandi samband var notað fyrir hvert sýni til að meta hvaða fæðuprepi það tilheyrði (Fisk o.fl. 2001):

$$FP_{\text{neytandi}} = 2 + (\delta^{15}\text{N}_{\text{neytandi}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{póláta í maí}}) / 3,8$$

Þar sem FP_{neytandi} táknar fæðuprep lífverunnar, $\delta^{15}\text{N}_{\text{póláta í maí}}$ er gildi fyrir pólátu sem

safnað var í maí (5,6), og 3,8 er hækkunarstuðull þessarar samsætu (Hobson & Welch 1992, Hobson o.fl. 1995).

Hlutlaus fitan var greind til að kanna hlutfallslega þyngdarsamsetningu fitusýrumethyllesters og fitualkóhólacetats. Fituforði sjávarlífvera er á formi hlutlausu fituhópna waxesters (WE) og/eða triacylglycerols (TAG). WE innihalda fitusýru og fitualkóhól í jöfnun mólhlutföllum (1:1) en TAG þrjár fitusýrur eingöngu. Þegar lífvera neytir fæðu sem er rík af WE þá er WE vatnsrofið (hydrolysed) í frjálsar fitusýrur og frjáls fitualkóhól sem er síðan breytt aftur í TAG eða í WE eftir því á hvaða formi lífveran geymir fitu (Falk-Petersen o.fl. 2002). Til að geta borið saman fituhópna WE og TAG á milli neytanda og bráðar, er því nauðsynlegt að leiðrétta fyrir mismunandi mólmasa fitusýra og fitualkóhóla. (Falk-



2. mynd. Hlutfall (%) fitusýra (fæðuvísa) af heildarfitu þeirra tegunda sem rannsakaðar voru í Íslandshafi í ágúst 2007 og 2008. Grænn litur táknar *Calanus*-fæðuvísa (20:1n9, 22:1n11), gulur og appelsínugulur táknar fæðuvísa einkennandi fyrir svipuþörungum (22:6n3, C18PUFA) og blár litur táknar einkennissfæðuvísa kísilþörungum (20:5n3, 16:1n7, C16PUFA).

Figure 2. Fatty acid trophic markers relative to total fat (%). Green: *Calanus*-fatty acid trophic markers (20:1n9, 22:1n11), yellow and orange: dinoflagellate trophic markers (22:6n3, C18PUFA) and blue: diatom trophic markers (20:5n3, 16:1n7, C16PUFA).

Petersen o.fl. 2002). Gögn fengin á þennan hátt kallast moiety-fitur eða moiety-fitusamsetning. Þegar hlutlausu fitan inniheldur bæði fituálkólacetat og fitusýrumethylester, eru moiety þeirra (með sömu lengd kolefniskeðju, sömu staðsetningu og fjölda tvítengja) sameinuð og gefa nýtt hlutfall.

Fæðutengsl lífveranna voru metin með fjölþáttagreiningu (e. Redundancy analysis, RDA). Sýni með lág moiety-fitugildi (<0,5%) voru undanskilin í greiningunum. Tegundir voru settar inn sem skýribreytur (explanatory variables), og moiety-fitugildi sem svarbreytur (response variables). Monte Carlo próf (með 999 umröðunum) var síðan notað til að kanna hvort marktækur munur væri á moiety-fitusamsetningu milli tegunda. Notað var forritið CANOCO 4.5 fyrir Windows® fyrir fjölþáttagreiningarnar. Einstök sýni voru notuð í greiningum en á 3. og 4. mynd eru meðaltalsgildi greininganna sýnd.

Niðurstöður

Vegna lágs lífmassa svifþörungum í Íslandshafi í maí og ágúst 2007 (Hafsteinn Guðfinns-

son 2012) voru síaðir um 20 lítrar af sjó fyrir hvert sýni af agnabundnu lífrænu efni (POM), sem tók allt að sex klukkutíma í vinnslu. Þar af leiðandi voru miklar líkur á mengun frá smáum dýrasvifstegundum sem lent gátu á síunni. Þetta var staðfest með hlutfallslega háu magni af fituálkólólum á móti heildarmagni fitusýra og fituálkólóla í POM (28-29%). Þess vegna var POM ekki notað sem grunnildi fæðuvefsins, þ.e. sem fulltrúi fæðuþreps 1, í útreikningum á fæðuþrepum.

Stöðugar samsætur

Lægstu samsætuhlutföll kolefnis ($\delta^{13}\text{C}$), um 25,5, mældust í lífrænu ögnunum (POM). Næstlægstar voru krabbaflær og stærri dýrasvifstegundir, en loðnulirfur (*M. villosus*) og marsíli (*A. marinus*) mældust með hæstu gildin (-18,9, 1. mynd).

Gildi fyrir samsætuhlutföll köfnunarefnis ($\delta^{15}\text{N}$) voru frá 4,9 hjá lífrænu ögnunum (POM) upp í 11,7 hjá fullorðinni loðnu og kolmunna (*Micromesistius poutassou*, 1. mynd).

Við útreikning á fæðuþrepum var gert ráð fyrir að póláta (*C. hyperboreus*), sem var safnað

Tafla 4. Fitusýru og fitualkóhól samsetning í lífrænum ögnum (POM), dýrasvífi og nokkurum fiskategundum í ágúst 2007 og 2008 í Íslandshafi. Hlutfall (%) fitusýra af heildarmagni fitusýra (efri hluti) og hlutfall fitualkóhóla af heildarmagni fitualkóhóla (neðri hluti). Neðsta lína sýnir hlutfall fitualkóhóla í heildarmagni fitu.

Table 4. Fatty acid and fatty alcohol composition, mass % of total fatty acids (upper part) and alcohols (lower part) of POM and the zooplankton and fish species in August 2007 and 2008 in the Iceland Sea.

POM	<i>C. finmarchicus</i> V (n=2)	<i>C. finmarchicus</i> V (n=14)	<i>C. hyperboreus</i> IV (n=3)	<i>C. hyperboreus</i> female (n=3)	<i>M. longa</i> female (n=6)	<i>P. glacialis</i> female (n=3)	<i>T. inermis</i> 2.5cm (n=5)	<i>T. longicaudata</i> 1-1.5cm (n=3)	<i>M. norvegica</i> 3-4cm (n=9)	<i>T. libellula</i> 0.7-1.5cm (n=9)	<i>T. libellula</i> 3-4.5cm (n=8)	<i>T. abyssorum</i> 0.35cm (n=3)	<i>T. abyssorum</i> 1.2-1.5cm (n=3)	<i>G. wilkitzkii</i> 2.5-4cm (n=6)	<i>E. hamata</i> 2.5-3cm (n=6)	<i>M. villosus</i> 4-7.5cm (n=18)	<i>M. villosus</i> 10.5cm (n=3)	<i>M. villosus</i> 11-17cm (n=20)	<i>G. morhua</i> 4-6cm (n=9)	<i>M. aeglefinus</i> 6.5-7.5cm (n=3)	<i>A. marinus</i> 8.5cm (n=3)	<i>M. poutassou</i> 30cm (n=3)	
Fitusýrur																							
14:0	10	17	8	5	2	1	3	6	7	6	5	5	4	5	3	8	9	8	6	4	8	4	
16:0	12	9	5	4	3	1	18	35	16	12	11	12	10	11	2	13	12	13	14	12	12	14	
16:1n9	2	1	1	1	2	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
16:1n7	5	10	10	9	16	25	10	9	9	5	10	4	9	23	10	9	8	9	9	4	6	6	
16:1n5	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	
16:3n4	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
16:4n1	1	3	2	2	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	
17:1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
18:0	6	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	2	0	1	1	1	1	1	3	6	1	2	
18:1n9	16	4	6	4	30	21	39	24	10	24	12	20	13	17	11	9	6	8	7	9	4	10	
18:1n7	1	1	1	1	1	1	11	7	5	2	3	2	3	4	1	2	2	2	10	3	2	3	
18:2n6	4	1	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
18:3n6	4	1	0	2	1	0	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	
18:3n3	2	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	
18:4n3	8	9	8	3	6	3	3	1	3	7	7	4	5	3	8	6	4	4	4	5	5	2	
18:5n3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20:1n11	1	1	1	2	1	1	0	0	1	1	4	2	4	1	2	0	1	1	1	1	1	1	
20:1n9	5	7	9	20	7	14	1	5	12	5	13	10	12	6	15	9	14	15	7	4	14	14	
20:1n7	0	1	2	2	0	0	0	0	1	0	1	1	2	1	1	0	0	1	0	1	0	1	
20:2n6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20:3n3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20:4n3	0	0	2	0	1	0	0	0	0	1	0	2	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	
20:4n6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	
20:5n3	7	14	9	14	12	6	6	2	11	10	10	13	11	11	13	14	8	6	16	20	9	9	
22:0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
22:1 n11	6	11	14	15	4	14	1	1	8	3	10	4	9	7	20	8	21	20	6	3	21	15	
22:1n9	2	1	2	6	1	1	0	1	1	1	2	4	2	1	2	1	1	2	1	1	1	2	
22:1n7	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
22:5n6	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	
22:5n3	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	1	0	
22:6n3	6	3	5	4	7	5	1	1	8	12	7	10	11	4	4	13	7	5	12	19	9	12	
Fitualkóhól																							
14:0	15	3	5	3	37	31	25	18	2	23	6	9	9	9	7	7	0	4	19	0	0	41	
16:0	25	9	11	4	30	14	61	15	29	28	9	16	10	11	11	12	0	29	41	0	7	27	
16:1n7	2	4	2	1	4	4	9	3	1	2	2	1	2	2	2	1	0	2	3	0	2	12	
18:1n9	2	3	2	0	1	1	0	0	9	1	1	1	1	2	2	5	37	24	3	0	4	0	
20:1n9	23	34	20	31	12	21	2	33	47	21	26	40	25	26	33	31	0	30	8	0	26	13	
22:1n11	28	43	55	51	12	25	3	26	0	22	48	23	42	42	40	39	63	10	25	0	61	7	
22:1n9	5	4	5	10	4	3	0	5	13	4	7	9	11	8	5	5	0	0	0	0	0	0	
%Fitualk.	28	46	49	45	32	39	25	1	0	19	24	27	15	12	46	9	0	0	3	0	7	1	

í maí, væri hrein jurtaæta eða á öðru fæðuþrepi, og því á lægsta þrepi af þeim dýrategunundum sem rannsakaðar voru. Umfangsmesta sýnatakan fór hinsvegar fram í ágúst og er þeim sýnum gerð skil hér. Í ágúst voru krabbaflærnar póláta og *M. longa*, ljósátan náttlampi (*M. norvegica*) og marflóin *G. wilkitzkii* með lægstu gildin. Af krabbaflónum var *P. glacialis* á hæsta fæðuþrepi (3,1) en fisklirfurnar tilheyrðu einnig svipuðu þrepi. Fullorðin loðna og kolmurni raðast í hæsta fæðuþrep (3,6, 1. mynd).

Fitugerðir

Fitusýrur voru notaðar sem fæðuvísar (fatty acid trophic markers) til að fylgja orkuflutningi um fæðuvefinn (Tafla 1). Alls greindust 40 fitusýrur og fitualkóhól, og í 37 þeirra var fituhlutfall a.m.k. 0.5% af heildarfitu (2. mynd, Tafla 4).

Fæðuvísar: Magn einkennisfæðuvísa (moiety-fitugildi) *Calanus* tegunda (20:1n9 og 22:1n11) mældist frekar hátt hjá öllum krabbaflónum, en *M. longa* og *P. glacialis* innihéldu þó lægri gildi (15% og 35%) en rauðáta (*C. finmarchicus*) og póláta (*C. hyperboreus*), sem framleiða þessar fitusýrur (45-55%, 2. mynd). Almenn höfðu krabbaflærnar hlutfallslega hærri gildi af kísilþörunga-fæðuvísnum (20:5n3, 16:1n9 og C16 FFS) heldur en svipuþörunga-fæðuvísnum (22:6n3 og C18 FFS). *Metridia longa* hafði lægstu gildin en póláta þau hæstu. Af ljósátunum reyndist náttlampi (*M. norvegica*) mælast með lang hæsta magn af *Calanus*-fæðuvísnum (20%, 2. mynd). Hins vegar mældist lægsta magn *Calanus*-fæðuvísa hjá augnsíli (*T. inermis*) og sporðkríli (*T. longicaudata*) af öllum þeim tegundum sem skoðaðar voru (2% og 7%). Náttlampi mældist með um helmingi herra magn af þörunga-fæðuvísnum en hinar ljósáturnar (2. mynd). Tiltölulega há gildi af *Calanus*-fæðuvísnum mældust hjá öllum marflónum (~14%-35%, 2. mynd). *Gammarus wilkitzkii* hafði heldur hærri gildi af þörunga-fæðuvísnum (38%) en *T. abyssorum* og *T. libellula* (24%-32%). Munurinn lá aðallega í háum gildum af kísilþörunga-fæðuvísnum 16:1n7 hjá *G. wilkitzkii* (21%), þau hæstu í þessari rannsókn. Pílormurinn *Eukrohnia hamata* mældist með hæstu gildi *Calanus*-fæðuvísa (52%), fyrir utan pólátu (55%, 2. mynd). Fitusýrusamsetningin í heild sinni reyndist svipuð og hjá pólátu og rauðátu. Hlutfallslegt magn *Calanus*-fæðuvísa eykst með aldri loðnu (*M. villosus*, 22% hjá lirfum, 35%

hjá eldri loðnu, 2. mynd). Marsíli (*A. marinus*), fullvaxin loðna og kolmurni (*M. poutassou*) hafa frekar há gildi af þessum fæðuvísnum (~29%-38%) en hins vegar mældust gildin hjá ýsu- (*Melanogrammus aeglefinus*), þorsk- (*G. morhua*) og loðnuungviði frekar lág (6%-22%). Fiskungviðið mældist hins vegar með tiltölulega hátt magn að þörungafæðuvísnum (~40%-50%), og þá sérstaklega af 20:5n3 og 22:6n3, í samanburði við eldri fiska (~26%-30%).

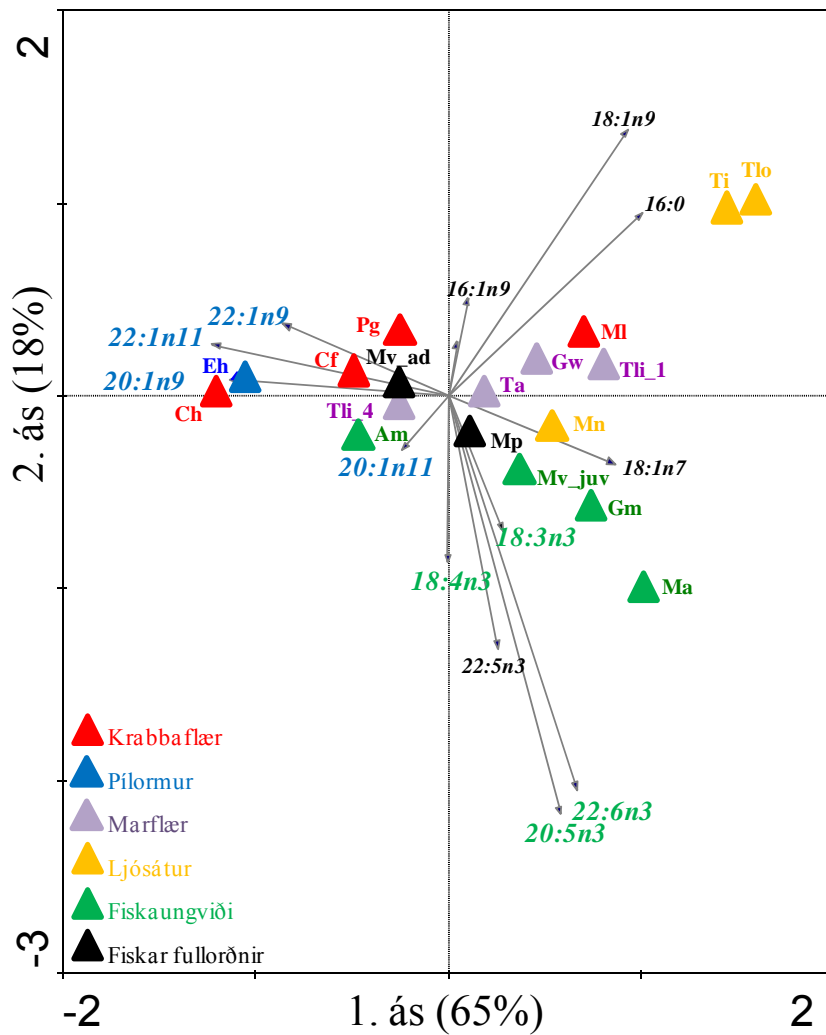
Fitualkóhól: Fitualkóhól reyndust um 32% - 49% af heildarmagni fitu hjá krabbaflónum (Tafla 4). Engin fitualkóhól fundust í ljósátunum náttlampa (*M. norvegica*) og sporðkríli (*T. longicaudata*) en 25% hjá augnsíli (*T. inermis*). Hjá marflónum reyndust alkóhólin um 12%-27% af heildarmagni fitu en 46% hjá pílorminum *E. hamata*. Fitualkól fundust í litlu magni hjá fiskunum og eingöngu hjá loðnurlirfum (*M. villosus*), marsíli (*A. marinus*) og þorskseiðum (*G. morhua*), líklega út af magainnihaldi (Tafla 4).

Fæðutengsl

Fjölpáttagreiningu (Redundancy analysis) var beitt til að skoða fæðutengsl lífveranna, þ.e.a.s. að bera saman moiety-fitusamsetningu þeirra. Gerðar voru tvær mismunandi greiningar, á grundvelli einstakra sýna, og voru niðurstöður eftirfarandi:

1. Greining á fæðutengslum allra lífvera sem rannsakaðar voru (3. mynd). Marktækur munur reyndist á moiety-fitusamsetningu mismunandi tegunda (Monte Carlo $F=16.5$, $P=0.002$). Fyrstu tveir ásarnir skýrðu 83% af breytileikanum í moiety-fitusamsetningu dýranna. Aðfallandinn á fyrsta ás skýrði 65% af breytileikanum og aðgreindi tegundir með há gildi af *Calanus*-fæðuvísnum sem röðuðust vinstra megin á grafið, t.d. rauðátu (*C. finmarchicus*), pólátu (*C. hyperboreus*), pílorminn *E. hamata*, marflóna *T. libellula* og fullorðnar loðnur (*M. villosus*) frá tegunum sem innihéldu nánast ekkert af þessum fæðuvísnum og röðuðust hægra megin á grafið t.d. augnsíli (*T. inermis*) og sporðkríli (*T. longicaudata*). Fallandinn á öðrum ás skýrði 18% af breytileikanum og virðist skilja fiskseiði sem röðuðust á neðri hluta grafsins frá öðrum tegundum þar sem fiskiungviðið inniheldur hærri gildi af þörungafæðuvísnum 20:5n3 og 22:6n3.

2. Greining á mikilvægi mismunandi bráða hjá fullorðinni loðnu (*M. villosus*, 4. mynd). Inni í greiningunni eru mismunandi lengdarflokkar, á



3. mynd. Fæðutengsl í Íslandshafi í ágúst 2007 og 2008. Fjölpáttagreining (Redundancy analysis) á moiety-fitusamsetningu allra tegunda. Þríhyrningar tákna viðkomandi tegundir (meðaltalsgildi). Tegundirnar voru settar inn sem skýribreytur (explanatory variables) og moiety sem svarbreytur (response variables). Örvanar tákna moiety-fitugildin og benda í þá átt sem mesta aukning er á viðkomandi moiety-fitu. Prósentutölurnar tákna breytileika sem skýrist af hverjum ás. Nafnagiftir: sjá skýringatexta við 1. mynd.

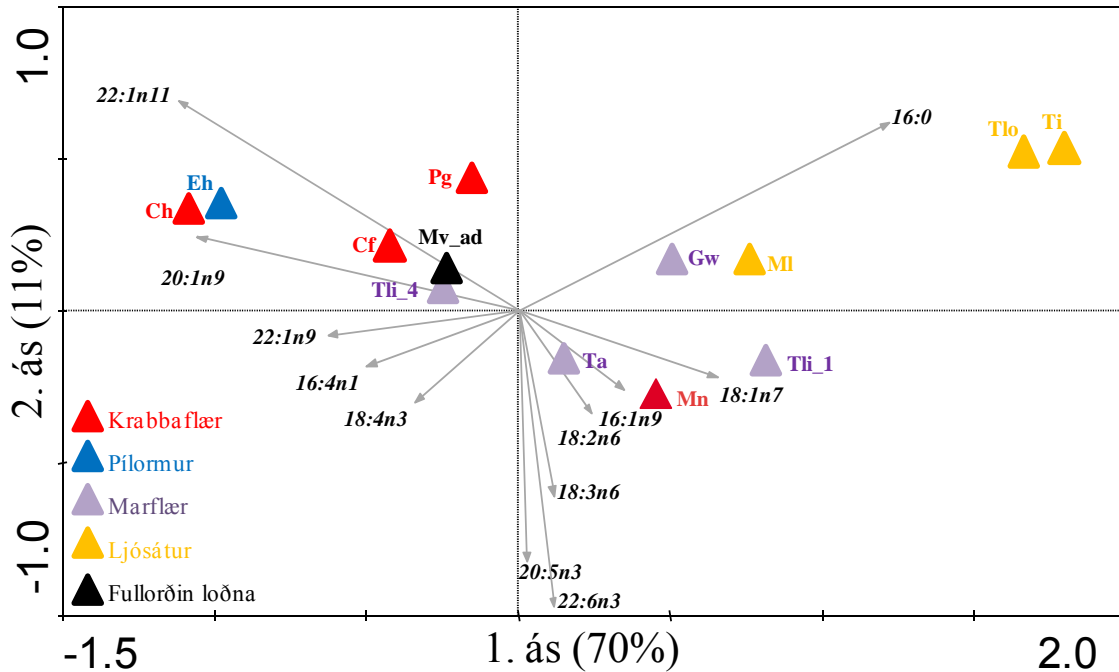
Figure 3. Trophic relationships in the Iceland Sea in August 2007 and 2008. Redundancy analysis (RDA) plot based on moiety values of all species. Triangles indicate mean values of the respective species. The species were applied as dummy variables (environmental variables) and moieties as response variables. The arrows point in the direction of steepest increase of the respective moiety. The fraction of unconstrained variance accounted for by each axis is given. Denomination: see explanations in figure 1.

lengdarbilinu 11–16 cm og líkleg fæða loðnunnar, innan ramma þessarar rannsóknar. Fyrstu tveir ásarnir skýrðu 81% af breytileikanum í moiety-fitusamsetningu dýranna. Aðal fallandinn á fyrsta ás skýrði 70% af breytileikanum og aðgreindi tegundir með há gildi af *Calanus*-fæðuvísunum, aðallega *Calanus* tegundirnar rauðátu (*C. finmarchicus*) og pólátu (*C. hyperboreus*), pílorminn *E. hamata* og 4 cm langa *T. libellula* (vinstra megin), frá tegundum sem innihéldu mun minna af þessum fæðuvísunum, t.d. sumar marflær og ljósátur (hægra megin). Ás tvö skýrir 11% breytileikans og aðgreinir dýr með hlutfallslega há gildi af þörun-gafæðuvísunum 20:5n3, 22:6n3, 18:4n3 (neðri hluti grafsins) frá öðrum dýrum (efri hluti grafsins). Fullorðin loðna raðast á mitt grafið og með loðnunni raðast marflóin *T. libellula* með svipaða moiety-fitusamsetningu.

Umræða

Í ágúst 2007 og 2008 ríkti dæmigert síðsumarástand Íslandshafi með litlu þöruna-

magni (a blaðgrænu) og næringarefnum í lágmarki (Hafsteinn Guðfinnsson 2012, Sólveig Ólafsdóttir 2012). Dýrasvifið, þ.e. jurtaæturnar, hefur síðsumars safnað forðafitu til að undirbúa sig fyrir langan vetur við takmarkaða fæðu (Falk-Petersen 1981, Clarke 1983, Hagen & Auel 2001, Anon 2007). Hið háa hlutfall fitualkóhóla (Tafla 4) sýnir að orkuforði krabbaflóa og pílorma var nær eingöngu í formi fituhóps waxestera (WE), sem er talin vera langtímaorkugeymsla, og því hentug fyrir dýr sem þurfa að svelta um lengri tíma, eins og oft er raunin á háum breiddargráðum. Ljósátutegundir sem rannsakaðar voru, innihéldu bæði WE og triacylglycerol (TAG), en TAG er aftur á móti talið vera skammtímaorkugeymsla og því gjarnan fitugerð dýra sem éta árið um kring (Lee o.fl. 1971a, 2006, Sargent and Henderson 1986). Ljósátan náttlampi reyndist vera eingöngu með slíka fitu. Marflærnar innihéldu hins vegar báðar fitugerðirnar en fiskarnir eingöngu TAG eins og þekkt er hjá flestum tegundum



4. mynd. Fæðutengsl fullorðinnar loðnu (11–16 cm) og bráðar í Íslandshafi í ágúst 2007 og 2008. Fjölpáttagreining (Redundancy analysis) á moiety-fitusamsetningu fullorðinnar loðnu og hugsanlegrar fæðu hennar. Þríhyrningar tákna viðkomandi tegundir (meðaltalsgildi). Tegundirnar voru settar inn sem skýribreytur (explanatory variables) og moiety sem svarbreytur (response variables). Örvarnar tákna moiety-fitugildin og benda í þá átt sem mesta aukning er á viðkomandi moiety-fitu. Prósentutölurnar tákna breytileika sem skýrist af hverjum ás. Nafnagiftir: sjá skýringatexta við 1. mynd.

Figure 4. Trophic relationships of adult capelin (11–16 cm) and its potential prey in the Iceland Sea, 2007 and 2008. Redundancy analysis plot based on moiety (“standardized fatty acids and fatty alcohols”) compositions of adult capelin and potential prey. Triangles indicate mean values of the respective species. The species were applied as dummy variables (environmental variables) and moieties as response variables. The arrows point in the direction of steepest increase of the respective moiety. The fraction of unconstrained variance accounted for by each axis is given. Denomination: see explanations in figure 1.

físka (Falk-Petersen o.fl. 1990).

Samkvæmt þessari rannsókn spannar uppsjávarvistkerfið í Íslandshafi u.þ.b. fjögur fæðuþrep, en fuglar og spendýr voru ekki viðfangsefni rannsóknarinnar. Krabbaflóin póláta er talin vera hrein jurtaæta í maí (Søreide o.fl. 2008) og voru þau sýni því talin lýsandi fyrir 2. fæðuþrep. Krabbaflærnar *M. longa* og póláta ásamt ljósátunni náttlampa og marflónni *G. wilkitzkii* tilheyrðu fæðuþrepi 2,4 og þar á eftir komu aðrar dýrasvifstegundir en 2–4 ára loðna og fullorðinn kolmunnur tilheyrðu hæsta fæðuþrepi (3,6). Fjöldi fæðuþrepa og útreiknuð gildi fyrir mismunandi tegundir var almennt svipað og í öðrum norðlægum uppsjávarvistkerfum eins og við Svalbarða (Søreide o.fl. 2006, Tamelander o.fl. 2006).

Póláta tilheyrir herra fæðuþrepi í ágúst (2,4) en í maí (2,0) sem gefur til kynna að hún breyti um fæðuval eftir fæðuframboði. Er hún nær eingöngu jurtaæta í maí þegar gnótt er af þörungum (Hafsteinn Guðfinnsson 2012). Í ágúst, þegar lítið framboð er af svifþörungum,

er hún einnig kjötæta og flokkast sem alæta. Þetta kom einnig í ljós í rannsóknnum sem framkvæmdar voru á pólátu við Svalbarða (Søreide o.fl. 2008). Af þeim krabbaflóm sem rannsakaðar voru reyndist *P. glacialis* tilheyrja hæsta fæðuþrepi (3,1), eða því sama og ýmsar fisklirfur, og telst hún því til kjötæta. Tiltölulega há gildi af *Calanus*-fæðuvísnum mældust hjá krabbaflónum *M. longa* og *P. glacialis*, sem gefur til kynna að *Calanus* sé hluti af fæðu þeirra, en aftur á móti benda há gildi af þörungafæðuvísnum til að þær éti einnig plöntusvif. Rannsóknir sýna að í Balsfjord í Norður Noregi sé *M. longa* einnig al- og kjötæta (Falk-Petersen 1990).

Ólíkt öðrum tegundum í þessari rannsókn reyndist mjög lítið af *Calanus*-fæðuvísnum hjá ljósátunum augnsíli og sporðkríli og þar af leiðandi eru *Calanus* tegundir ekki mikilvægar sem fæða fyrir þær. Þessar ljósátutegundir tilheyrja fæðuþrepi 2,5–2,7, og má álykta að þær séu al- og kjötætur og smávaxið dýrasvif sé líklega mikilvægt í fæðu þeirra. Þessi fæðuþreps-

gildi eru svipuð og í öðrum rannsóknum (Søreide o.fl. 2006, Tamelander o.fl. 2006). Sú niðurstaða að augnsíli sé al- og kjötæta stingur í stúf við rannsóknir Falk-Petersen o.fl. (2000), þar sem ályktað var að augnsíli sé eingöngu jurtaæta. Taka verður fram að sú ályktun byggðist einungis á fitugögnum en í þessari rannsókn er einnig stuðst við samsætumælingar. Af ljósátunum tilheyrði náttlampi lægsta fæðuprepi (2,4). Í Íslandshafi eru *Calanus* tegundir mikilvægar í fæðu náttlampa sem reyndist hins vegar ekki vera tilfellið suður af landinu (Hildur Pétursdóttir o.fl. 2008). Frekar há gildi af þörungafæðuvísunum bentu einnig til þörungaafts. Það er í samræmi við aðrar rannsóknir sem sýna náttlampa vera al- og kjötætu (Mauchline & Fisher 1969, Falk-Petersen o.fl. 2000, Hildur Pétursdóttir o.fl. 2008).

Calanus-fæðuvísarnir hjá uppsjávar marflónum *T. libellula*, *T. abyssorum* og *G. wilkizkii* sýna að *Calanus* tegundir eru í fæðu þeirra að hluta. Af þeim marflóm sem rannsakaðar eru hér tilheyrir *G. wilkizkii* heldur lægra fæðuprepi (2,4) en hinar marflærnar (2,6-2,9), sem gefur til kynna að *G. wilkizkii* éti einnig plöntusvif. Búsvæði *G. wilkizkii* er við og undir ís þar sem hún étur íspörunga og krabbafær skyldar rauðátu (Lønne & Gulliksen 1991, Werner 1997, Scott o.fl. 2001). Einnig hefur hún fundist fjarri landi, þar sem ísa hefur leyst (Steele & Steele 1974, Werner o.fl. 1999, Scott o.fl. 2001) eins og í þessari rannsókn, og er fæðan þá aðallega *Calanus* tegundir. Ennfremur er *G. wilkizkii* þekkt fyrir að breyta fæðuáttferli sínu eftir því sem dýrin stækka, þar sem minni dýr eru jurtaætur en þau stærri al- og kjötætur (Scott o.fl. 2001). *Gammarus wilkizkii* er ekki algeng tegund í uppsjávarkerfinu í Íslandshafi (Ólafur Ástþórsson o.fl. 1995, Dalpadado o.fl. 1998, Ástþór Gíslason & Ólafur Ástþórsson 1998), samt sem áður var hún hnappdreifð og í þó nokkru magni í kalda arktíska sjónum í þessari rannsókn (Ástþór Gíslason þessi skýrsla). Fitusýrusamsetning *G. wilkizkii* í Íslandshafi er sambærileg við mælingar á þessari tegund í Kongsfjord við Svalbarða (Scott o.fl. 2001).

Moiety-fitusamsetning pílormsins *E. hamata* var líkust samsetningu rauðátu af öllum þeim tegundum sem rannsakaðar voru. Út frá þessum niðurstöðum, ásamt miklu magni af *Calanus*-fæðuvísunum og niðurstöðum úr mælingum á stöðugum samsætum má álykta að *Calanus*

tegundir séu mjög mikilvæg fæða pílormsins. Á norðurheimskautinu tilheyrir *E. hamata* sama fæðuprepi og hún gerir í þessari rannsókn og *Calanus* tegundir eru þar einnig mikilvægur hluti fæðu þeirra (Søreide o.fl. 2006, Froneman o.fl. 1998).

Fiskungviðið í þessari rannsókn, þ.e. loðna, þorskur, ýsa og marsíli, hafa svipuð fæðuprepsgildi (3,2) og svipaða fitusýrusamsetningu. Þetta bendir til svipaðs fæðuvals, mjög líklega til dýrasvifs sem aftur étur svifþörungum. Þetta er í samræmi við aðrar rannsóknir á fæðu fiskungviðis í hafinu kringum Ísland, sem sýna að ljósátur og krabbafærnar rauðátu og *Acartia* spp. eru aðalfæða loðnu og þorsklirfa (Ólafur K. Pálsson 1974). Athygli vekur að loðnulirfur hafa hærri gildi af ^{13}C en fullorðnar loðnur. Þessi háu gildi gætu gefið til kynna að ungvíðið sé að éta dýr með með hærri $\delta^{13}\text{C}$ gildi en fullorðnu dýrin eru að éta. Líklegra er þó að þennan mun megi rekja til mismunandi meðhöndlunar sýna, þ.e. að mældir voru heilir einstaklingar hjá lirfum en vöðvasýni úr fullorðnum dýrum. En þekkt er að beinvefur hefur hærri gildi af ^{13}C en vöðvavefur (Sholto-Douglas o.fl. 1991) og þar af leiðandi hafi ungvíðið mælst með hærri gildi en fullorðin dýr.

Hlutfallslega lítið magn er af *Calanus*-fæðuvísunum í loðnulirfum en *Calanus* tegundir eru þó hluti af fæðu allra þroskastiga loðnu og eykst hlutfallslegt magn *Calanus*-fæðuvísanna með aldri og er langhæst í fullorðnum dýrum. Ljósátulirfur eru hugsanlega mikilvægar í fæðu loðnulirfa, m.a. vegna hárra gilda af þörungafæðuvísunum 20:5n3 og 22:6n3, en *Calanus* tegundir virðast hverfandi hluti fæðunnar. Há gildi af *Calanus*-fæðuvísunum í fullorðnum loðnum, ásamt gildi stöðugra samsæta, gefa til kynna að bæði *Calanus* tegundir og dýr á hærri fæðuprepum, sem eru rík af *Calanus*-fæðuvísunum (stærri dýrasvifstegundir t.d. marflær og ljósátur) eru mikilvægar í fæðu fullorðinnar loðnu. Áhugavert er að marflær, og þá sérstaklega kaldsjávarmarflóin *T. libellula*, virðist vera mikilvægasta fæða fullorðinnar loðnu í Íslandshafi í ágúst (raðast saman í fjölpáttagreiningu). Eldri rannsóknir í Íslandshafi sýna að rauðátu og ljósátur eru mikilvægur hluti af fæðu fullorðinnar loðnu (Þorsteinn Sigurðsson & Ólafur Ástþórsson 1991, Ólafur Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1997).

Á síðustu árum hefur uppsjávurfiskurinn kolmunninn fundist í miklu magni á Íslandsmiðum og varð hans einnig vart í norðaustanverðu

Íslandshafi í ágúst 2007 (Ólafur K. Pálsson o.fl. 2012, Ólafur Ástþórsson o.fl. 2007). Kolmurni og loðna (14-16 cm) hafa svipað fæðuval, það er tilheyra sama fæðuprepi (3,6), hafa nánast sama $\delta^{13}\text{C}$ gildi og svipaða moiety-fítusamsetningu. Ef útbreiðsla og magn kolmunna eykst verulega á Íslandsmiðum gæti það leitt til samkeppni milli loðnu og kolmunna um fæðu.

Þakkir

Skipverjum á rannsóknaskipunum Árne Friðriksson og Bjarni Sæmundsson er þakkað fyrir aðstoð við gagnasöfnun á sjó. Samstarfsfélagar í Íslandshafsverkefni Hafrannsóknastofnunarinnar, sem þessi rannsókn er hluti af, fá þakkir fyrir góða samvinnu á láði og legi. Vil ég þar sérstaklega nefna Ólaf K. Pálsson og Konráð Þórisson fyrir yfirlestur, Sólveigu Ólafsdóttur fyrir hjálp við efnafræðilýsingar og félagi mína á átudeildinni þau Ástþór Gíslason og Teresa Silva. Einnig vil ég þakka félögum á Norsku Heimskautastofnuninni (Norwegian Polar Institute), þeim Stig Falk-Petersen og Anette Wold, fyrir faglega aðstoð.

Heimildir

- Anon. 2005. Nytjastofnar sjávar 2004/2005, aflahorfur fiskveiðiárið 2005/2006 (State of marine fish stocks in Icelandic waters 2004/2005, prospects for the quota year 2005/2006). *Hafrannsóknastofnunin Fjölrit* 121, 182 bls. (In Icelandic, English summary).
- Anon. 2007. Þættir úr vistfræði sjávar 2007 (Environmental conditions in Icelandic waters 2007). *Hafrannsóknastofnunin Fjölrit* 139, 40 bls. (In Icelandic, English summary).
- Ástþór Gíslason & Ólafur S. Ástþórsson 1998. Seasonal variations in biomass, abundance and composition of zooplankton in the sub-arctic waters north of Iceland. *Polar Biology* 20: 85-94.
- Christie, W. W. 1982. A simple procedure for rapid transmethylation of glycerolipids and cholesterol esters. *Journal of Lipid Research* 23: 1072-1075.
- Clarke, A. 1983. Life in cold water: the physiological ecology of polar marine ectotherms. *Oceanography and Marine Biology* 21: 341-453.
- Dahl, T. M., Falk-Petersen, S., Gabrielsen, G. W., Sargent, J. R., Hop, H. & Millar, R.-M. 2003. Lipids and stable isotopes in common eider, black-legged kittiwake and northern fulmar: a trophic study from an Arctic fjord. *Marine Ecology Progress Series* 256: 257-269.
- Dalpadado, P., Ellertsen, B., Melle, W. & Skjoldal, H. R. 1998. Summer distribution patterns and biomass estimates of macrozooplankton and micronecton in the Nordic seas. *Sarsia* 83: 103-116.
- Dalsgaard, J., St John, M., Kattner, G., Muller-Navarra, D. & Hagen, W. 2003. Fatty acid trophic markers in the pelagic marine environment. *Advances in Marine Biology* 46: 225-340.
- DeNiro, M.,J. & Epstein, S. 1978. Influence of diet on distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 42: 495-506.
- DeNiro, M.,J. & Epstein, S. 1981. Influence of diet on the distribution of nitrogen isotopes in animals. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 45: 341-351.
- Falk-Petersen, S. 1981. Ecological investigations on the zooplankton community in Balsfjorden, northern Norway: Seasonal changes in body weight and the main biochemical composition of *Thysanoessa inermis* (Krøyer), *T. raschii* (M. Sars) and *Meganyctiphanes norvegica* (M. Sars) in relation to environmental parameters. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 49: 103-120.
- Falk-Petersen, S., Hopkins, C. C. E. & Sargent, J. R. 1990. Trophic relationships in the pelagic, arctic food web. Í *Trophic relationships in the marine environment*. Ritstj. M. Barnes, R. N. Gibson. Aberdeen University Press, Aberdeen, bls. 315-333.
- Falk-Petersen, S., Hagen, W., Kattner, G., Clarke, A. & Sargent, J. 2000. Lipids, trophic relationships, and biodiversity in Arctic and Antarctic krill. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57: 178-191.
- Falk-Petersen, S., Dahl, T. M., Scott, C. L., Sargent, J. R., Gulliksen, B., Kwasniewski, S., Hop, H. & Millar, R. M. 2002. Lipid biomarkers and trophic linkages between ctenophores and copepods in Svalbard waters. *Marine Ecology Progress Series* 227: 187-198.
- Falk-Petersen, S., Haug, T., Nilssen, K. T., Wold, A. & Dahl, T. M. 2004. Lipids and trophic linkages in harp seal (*Phoca groenlandica*) from the eastern Barents Sea. *Polar Research* 23: 43-50.
- Fisk, A. T., Hobson, K. A. & Norstrom, R. J. 2001. Influence of chemical and biological factors

- on trophic transfer of persistent organic pollutants in the Northwater Polynya marine food web. *Environmental Science and Technology* 35: 732-738.
- Froneman, P. W., Pakhomov, E. A., Perissinotto, R. & Meaton, V. 1998. Feeding and predation impact of two chaetognath species, *Eukrohnia hamata* and *Sagitta gazellae*, in the vicinity of Marion Island (southern ocean). *Marine Biology* 131: 95-101.
- Fry B. 1988. Food web structure on Georges Bank from stable C, N, and S isotopic compositions. *Limnology and Oceanography* 33: 1182-1190.
- Graeve M., Hagen W. & Kattner G. 1994. Diet-induced changes in the fatty acid composition of Arctic herbivorous copepods: experimental evidence of trophic markers. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 182: 97-110.
- Grahl-Nielsen O. & Mjaavatten O. 1991. Dietary influence on fatty acid composition of blubber fat of seals as determined by biopsy: A multivariate approach. *Marine Biology* 110: 59-64.
- Hafsteinn Guðfinnsson 2012. Breytingar á blaðgrænumagni, frumframleiðni og tegundasamsetningu svifþörungna í Íslandshafi *Hafraunnsóknir* nr. 164: 45-66.
- Hagen, W. & Auel, H. 2001. Seasonal adaptations and the role of lipids in oceanic zooplankton. *Zoology* 104: 313-326.
- Harris, R. P. 1996. Feeding ecology of *Calanus*. *Ophelia* 44: 85-109.
- Hecky, R. E. & Hesslein, R. H. 1995. Contribution of benthic algae to lake food webs as revealed by stable isotope analysis. *Journal of the North American Benthological Society* 14: 631-653.
- Hildur Pétursdóttir, Ástþór Gíslason, Falk-Petersen, S., Hop, H. & Jörundur Svavarsson 2008. Trophic interactions of the pelagic ecosystem over the Reykjanes Ridge as evaluated by fatty acid and stable isotope analyses. *Deep-Sea Research Part II* 55: 83-93.
- Hjálmar Vilhjálmsson 1994. The Icelandic capelin stock. Capelin, *Mallotus villosus* (Müller), in the Iceland – Greenland - Jan Mayen area. *Rit Fiskideildar* 8: 1-281.
- Hobson, K. A. & Welch H. E. 1992. Determination of trophic relationships within a high arctic marine food web using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis. *Marine Ecology Progress Series* 84: 9-18.
- Hobson, K. A., Ambrose Jr., W. G. & Renaud, P. E. 1995. Sources of primary production, benthic-pelagic coupling, and trophic relationships within the Northeast Water Polynya: Insights from $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis. *Marine Ecology Progress Series* 128: 1-10.
- Jón Sólmundsson 2007. Trophic ecology of Greenland halibut (*Reinhardtius hippoglossoides*) on the Icelandic continental shelf and slope. *Marine Biology Research* 3: 231-242.
- Kaluzny, M. A., Duncan, L. A., Merritt, M. V. & Epps, D. E. 1985. Rapid separation of lipid classes in high-yield and purity using bonded phase columns. *Journal of Lipid Research* 26: 135-140.
- Kharlamenko, V. I., Kiyashko, S. I., Imbs, A. B. & Vyshkvartzev, D. I. 2001. Identification of food sources of invertebrates from the seagrass *Zostera marina* community using carbon and sulphur stable isotope ratio and fatty acid analyses. *Marine Ecology Progress Series* 220: 103-117.
- Kjartan G. Magnússon & Ólafur K. Pálsson 1989. Trophic ecological relationships of Icelandic cod. *Rapports et Procès-verbaux des Réunions Conseil International pour l'Exploration de la Mer* 188: 206-224.
- Lee, R. F., Hirota, J. & Barnett A. M. 1971a. Distribution and importance of wax esters in marine copepods and other zooplankton. *Deep-Sea Research* 18: 1147-1165.
- Lee, R. F., Nevenzel, J. C. & Paffenhöfer G. A. 1971b. Importance of wax esters and other lipids in marine food chain: phytoplankton and copepods. *Marine Biology* 9: 99-108.
- Lee, R. F., Hagen, W. & Kattner, G. 2006. Lipid storage in marine zooplankton. *Marine Ecology Progress Series* 307: 273-306.
- Lønne, O-J. & Gulliksen, B. 1991. Source, density and composition of sympagic fauna in the Barents Sea. *Polar Research* 10: 289-294.
- Mauchline, J. & Fisher, L. R. 1969. The biology of euphausiids. *Advances in Marine Biology* 7: 1-421.
- Minagawa, M. & Wada, E. 1984. Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 48: 1135-1140.
- Ólafur K. Pálsson 1974. Investigation on the food of young fish (0-group) in Icelandic waters. (In Icelandic, English summary). *Náttúrufræðingurinn* 44: 1-21.
- Ólafur K. Pálsson 1997. The feeding of cod (in Icelandic). *Hafrannsóknastofnun Fjölrít* 57: 177-191.

- Valdimarsson, Ástþór Gíslason, Hjálmar Vilhjálmsson 2012. Lífshættir loðnu í Íslandshafi. *Hafrannsóknir* nr. 164: 5-13.
- Ólafur S. Ástþórsson, Ástþór Gíslason & Guðmundur S. Jónsson 1995. Zooplankton biomass and composition in the western Iceland Sea during autumn. Extended Abstracts Volume from a Symposium on Nordic Seas, Hamburg. Arctic Ocean Science Board and Sonderforschungsbereich "Processes relevant to climate", 21-24.
- Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1997. On the food of capelin in the subarctic waters north of Iceland. *Sarsia* 82: 81-86.
- Ólafur S. Ástþórsson, Ástþór Gíslason & Steingrímur Jónsson 2007. Climate variability and the Icelandic marine ecosystem. *Deep-Sea Research II* 54: 2456-2477.
- Peterson B. J. 1999. Stable isotopes as tracers of organic matter input and transfer in benthic food webs: A review. *Acta Oecologica* 20: 479-487.
- Peterson B. J. & Fry B. 1987. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics* 18: 293-320.
- Post D. M. 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions. *Ecology* 83: 703-718.
- Rau, G. H., Ainley D. G., Bengtson, J. L., Torres, J.J. & Hopkins, T. L. 1992. $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ and $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ in Weddell Sea birds, seals, and fish: implications for diet and trophic structure. *Marine Ecology Progress Series* 84: 1-8.
- Sargent, J. R. & Henderson, R. J. 1986. Lipids. In: Corner E.D.S. and O'Hara S.C.M. (Eds.), *The biological chemistry of marine copepods*. Clarendon Press, Oxford, s. 59-108.
- Scott, C. L., Falk-Petersen, S., Gulliksen, B., Lønne, O. J. & Sargent, R. 2001. Lipid indicators of the diet of sympagic amphipod *Gammarus wilkitzkii* in the Marginal Ice Zone and in open waters of Svalbard (Arctic). *Polar Biology* 24: 572-576.
- Sholto-Douglas, A. D., Field, J. G., James, A. G. & van der Merwe, N. J. 1991. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ isotope ratios in the Southern Benguela Ecosystem: indicators of food web relationships among different size classes of plankton and pelagic fish; differences between fish muscle and bone collagen tissues. *Marine Ecology Progress Series* 78: 23-31.
- Sólveig Ólafsdóttir 2012. Svæðatengdur styrkur og nýting næringarefna í Íslandhafi. *Hafrannsóknir* 164: 30-44.
- Steele, D.,H. & Steele, V. J. 1974. The biology of *Gammarus* (Crustacea, Amphipoda) in the north-western Atlantic. VIII. Geographic distribution of the northern species. *Canadian Journal of Zoology* 52: 1115-1120.
- Søreide, J. E., Hop, H., Carroll, M. L., Falk-Petersen, S. & Hegseth, E. N. 2006. Seasonal food web structures and sympagic-pelagic coupling in the European Arctic revealed by stable isotopes and a two-source food web model. *Progress in Oceanography* 71: 59-87.
- Søreide, J. E., Falk-Petersen, S., Hegseth E. N., Hop, H., Carroll, M. L., Hobson, K. A. & Blachowiak-Samolyk, K. 2008. Seasonal feeding strategies of *Calanus* in the high-Arctic Svalbard region. *Deep-Sea Research II* 55: 2225-2244.
- Tameler, T., Renaud, P. E., Hop, H., Carroll, M. L., Ambrose Jr., W. G. & Hobson, K. A. 2006. Trophic relationships and pelagic-benthic coupling during summer in the Barents Sea Marginal Ice Zone, revealed by stable carbon and nitrogen isotope measurements. *Marine Ecology Progress Series* 310: 33-46.
- Werner, I. 1997. Grazing of the Arctic under-ice amphipods on sea-ice algae. *Marine Ecology Progress Series* 160: 92-99.
- Werner, I., Auel, H., Garrity, C. & Hagen, W. 1999. Pelagic occurrence of the sympagic *Gammarus wilkitzkii* in ice-free waters of the Greenland sea – dead end or part of life-cycle? *Polar Biology* 22: 56-60.
- Þorsteinn Sigurðsson & Ólafur S. Ástþórsson 1991. Aspects of the feeding of capelin (*Mallotus villosus*) during autumn and early winter in the waters north of Iceland. ICES C. M. 1991/H: 49, 16 bls.
- Þórunn Þórðardóttir 1994. Plöntusvif og frumframleiðni í sjónum við Ísland (Phytoplankton and primary production in Icelandic waters). Í *Íslendingar, hafið og auðlindir þess (Icelanders, the Ocean and its Resources)*. Ritstj. Unnsteinn Stefánsson. Societas Scientiarum Islandica, Reykjavík, bls. 65-88 (in Icelandic).

Uppruni og rek loðnulirfa

Björn Gunnarsson og Konráð Þórisson

Hafrannsóknastofnunin

Ágrip

Björn Gunnarsson og Konráð Þórisson 2012. Uppruni og rek loðnulirfa. Hafrannsóknir nr. 164. Sumarið 2007 var uppruni og rek loðnulirfa kortlagt í þremur rannsóknaleiðöngnum sem farnir voru í apríl, maí og ágúst. Niðurstöður voru bornar saman við eldri mælingar og gerð tilraun til að meta afföll. Loðnulirfurnar voru veiddar með 1 m² Tucker háfi úti fyrir Suður- og Vesturlandi í apríl og umhverfis landið í maí. Í ágúst var veitt bæði með 4 m² Tucker háfi á landgrunninu vestan- og norðanlands og með seiðavörpu, aðallega djúpt úti af Norðurlandi. Líklegt er að hrygning eigi sér stað á svipuðum tíma allt í kring um landið, en að egginn klekist út allt að 4 vikum síðar við Norður- og Austurland vegna lágs botnhita þar. Eins og fyrri rannsóknir gefa til kynna átti meginhrygningin sér stað í mars-apríl við Suður- og Vesturland. Áramunur virðist í hrygningu við Norðaustur- og Austurland samkvæmt eldri gögnum, en þar virtist talsverð hrygning árið 2007. Miðað við eftirlifendur í Íslandshafi í ágúst og 3 sjómilna meðalrekhraða á dag, má ætla að klak loðnulirfa á suðvesturmiðum í mars 2007 hafi misfarist og einnig klak í apríl á norðvesturmiðum. Klakhópar, sem virðast hafa lifað af fram í ágúst eru því lifur sem klöktust út í maí á suðvesturmiðum en í maí eða síðar á norðvesturmiðum. Aldursgreining sýnir að stærðarmun loðnulirfa eftir svæðum má að stærstum hluta rekja til mismunandi aldurs en ekki til mismunandi vaxtarhraða eftir sjávarhita. Bakreiknuð klakdagadreifing sýnir að loðnulirfur á norður- og austursvæðunum áttu að stórum hluta uppruna sinn að rekja til staðbundinnar hrygningar og að rek lifra frá Suðurlandi inn á norðursvæðið var takmarkað árið 2007. Meðalafföll loðnulirfa úti fyrir Suðausturlandi, á 38 daga tímabili frá því skömmu eftir klak (apríl) og fram í maí 2007, var metið 7% á dag.

Abstract

Björn Gunnarsson and Konráð Þórisson 2012. The origin and drift route of capelin larvae. Marine research in Iceland no. 164. In 2007 an attempt was made to map the drift and origin of capelin larvae in Icelandic waters during three research cruises. The results were compared with earlier research findings and an attempt was made to estimate mortality. Samples were collected off the south and west coasts in April and around Iceland in May, using a 1 m² opening Tucker trawl. In August, pelagic 0-group capelin were sampled with a large Tucker trawl with 4 m² opening in shelf areas off the west and north coasts, but larger 0-group capelin found in deep waters off

the north coast were sampled with a small-mesh pelagic trawl. Historically, the 0-group capelin found north and east of Iceland in the fall are believed to originate from the main spawning grounds off the south and west coasts. The capelin drift with clockwise currents around Iceland. The spawning time appears to be similar in all locations around Iceland, but the eggs take up to 4 weeks longer to hatch at the north and east coasts because of the low bottom temperature. Similar to earlier results, the main spawning took place at the south and west coasts in March-April. According to earlier data, there seems to be large interannual variation in the spawning off the northeast and east coasts, but there appeared to be a considerable spawning activity in 2007 in this area. Age readings indicate that the size difference of capelin larvae by areas is mainly explained by difference in age and not by difference in growth rates. Back-calculated hatch dates show that many of the capelin larvae in the north and east originate in local spawning and that inflow of Atlantic water onto the shelf north of Iceland was limited in 2007. Judging from the surviving larvae in the Iceland sea in August and an average driftspeed of 3 nmd⁻¹, the larvae hatched in March at the southwest coast and in April at the northwest coast, seem to have perished. The hatching groups that seem to have survived to August are larvae hatched in May at the southwest coast and larvae hatched in May or later at the northwest coast. Average mortality of capelin larvae at the southeast coast during 38 days after hatching was estimated 7% per day.

Inngangur

Talið er að meginhrygning loðnunnar við Ísland eigi sér stað úti fyrir suður- og vesturströndinni í mars og apríl. Þaðan rekur lifur síðan vestur og norður fyrir land með Irmingerstraumnum og strandstraumnum. Lifurekið er þó afar breytilegt frá ári til árs vegna breytileika í styrk strandstraumsins og flæði Atlantsjárinn inn á Norðurmið (Hjálmar Vilhjálmsson 1994). Þá er einnig vitað að loðnan hrygnir inni á fjörðum og flóum norðan og austan lands en þessi hrygning er jafnan talin lítil í samanburði við hrygninguna við Suður- og Vesturland.

Loðnan hrygnir á sandbotni, oftast á innan við 100 metra dýpi og límast hrognin við botnsetið. Við Suður- og Vesturströndina er botnhiti að vori oft um 7°C, en við það hitastig tekur það

egginn um 3 vikur að klekjust út (Eyjólfur Friðgeirsson 1976). Sjávarhiti hefur mikil áhrif á klaktímann, sem getur meira en tvöfaldast við lágt hitastig (Frank and Leggett 1981, Gjosæter 1998). Loðnulirfur eru um 5-8 mm langar við klak (Eyjólfur Friðgeirsson 1976, Gjosæter 1998) og lengjast um 0,2-0,4 mm á dag fyrstu vikurnar (Ivarjord o.fl. 2008).

Loðnan er veidd í miklum mæli úr hrygningargöngunni í janúar-apríl en gangur veiðanna er vanalega sá, að veiðiflotinn fylgir eftir þéttum torfum frá Norðausturlandi, suður og vestur um í Faxaflóa eða jafnvel norður á Breiðafjörð. Þá koma oft minni háttar göngur af Vestfjarðamiðum og hrygna við Snæfellsnes og í Faxaflóa. Frávik frá þessu göngumunstri eru sjaldgæf, en auk austanganganna hefur um helmingur hrygningarstofnsins stöku sinnum gengið beint af Vestfjarðamiðum til hrygningar á Breiðafirði, í Faxaflóa og jafnvel sunnan Reykjaness, (Hjálmar Vilhjálmsson 1994). Eftir að gangan stöðvast hrygnir loðnan og drepst á fáeinum dögum og því getur virst sem hrygningin standi yfir í mjög stuttan tíma. Í þessum hluta göngunnar eru hins vegar þéttustu torfurnar, þ.e. þær sem gefa mestan afla, en á eftir fylgja minni og dreifðari göngur sem hrygna síðar. Þótt meginhrygningin eigi sér þannig stað í mars og apríl, getur loðnuhrygningin í heild staðið í a.m.k. 4 mánuði, eða frá mars og fram í júní eða jafnvel júlí (Jespersen 1920, Jutta Magnússon 1966).

Þrátt fyrir að loðna hafi ekki verið veidd að neinu ráði fyrr en upp úr 1965, voru talsverðar rannsóknir stundaðar á tegundinni löngu fyrr. Danir stunduðu fyrstir fisklirfurannsóknir umhverfis landið á árunum 1903-08 og þar var í fyrsta sinn sýnt fram á að loðnulirfur eru uppistaðan í fiskasvifinu umhverfis Ísland (Schmidt 1906, Jespersen 1920).

Þótt útbreiðsla loðnulirfa hafi verið rannsökuð hér við land nokkrum sinnum áður, hefur ekki áður verið skipulögð rannsókn í því augnamiði að kanna uppruna og rek loðnulirfa við Ísland, eins og sést á eftirfarandi tilvitnun, sem enn átti við árið 2006. *“No comprehensive research has been carried out specifically in order to map the temporal/spatial progress of the capelin larvae during the first months of their life”* (Hjálmar Vilhjálmsson 1994).

Markmið þessarar rannsóknar voru, 1) að kortleggja útbreiðslu hrygningar, 2) að kortleggja rek loðnulirfa, 3) að bera niðurstöður um hrygningu og rek saman við eldri mælingar og

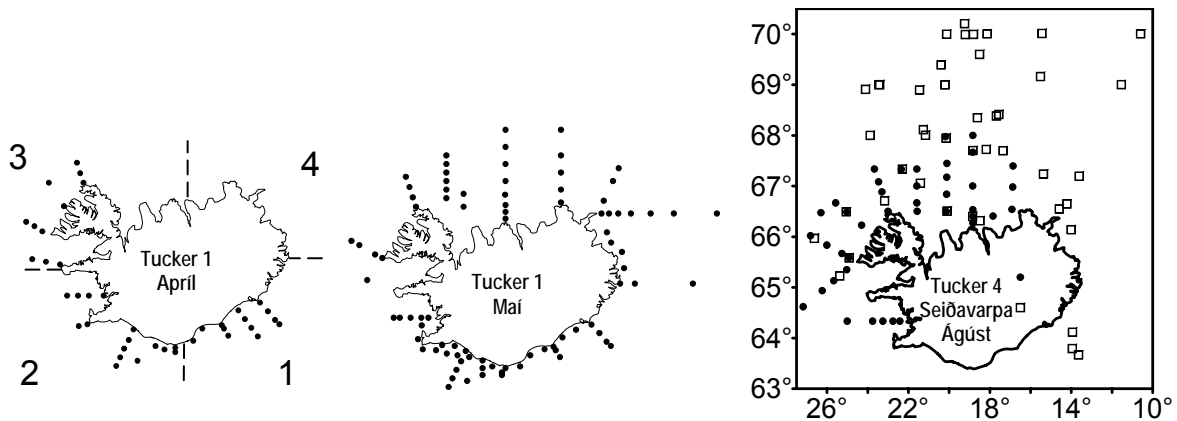
4) að leiða líkur að uppruna loðnulirfanna með aldursgreiningu. Auk þess var gerð tilraun til að meta afföll loðnulirfa fyrsta mánuðinn eftir klak.

Efniviður og aðferðir

Sýnasöfnun fór aðallega fram á landgrunninu við Ísland í þremur leiðöngrum á rs. Bjarna Sæmundssyni árið 2007. Til einföldunar á tölfræðilegum samanburði var rannsóknasvæðinu skipt í fjóra hluta (1. mynd, svæði 1-4). Í fyrsta leiðangri, 14.–18. apríl 2007, var loðnulirfum safnað á 41 stöð á hrygningar-slóð frá Höfn í Hornafirði, vestur og norður með landinu, að Hornbjargi (1. mynd, svæði 1-3). Notaður var “Tucker 1” háfur sem dreginn var í V-laga ferli frá yfirborði niður á 50 m dýpi (eða u.þ.b. 5 m yfir botni þar sem grunnt var) og í yfirborð á ný. Háfnum var slakað og hann hífður á um 0,5 ms⁻¹ hraða, meðan rannsóknaskipið sigldi á u.þ.b. 2 sjómílna ferð á klst. (= 1 ms⁻¹). Stærð háfopsins var 1 x 1 m en möskvastærðin í netinu 333 µm. Rúmmál sjávarins, sem háfurinn síaði var mælt með flæðismæli í opi háfsins. Í öðrum leiðangri, 14.–27. maí 2007, voru tekin sýni á 86 stöðvum allt í kringum landið (1. mynd, svæði 1–4) og var þá einnig notaður “Tucker 1” háfur. Í þriðja leiðangri, 08.–26. ágúst 2007, voru tekin sýni á 44 stöðvum með Harstad flotvörpu á rekslód fyrir vestan, norðan og austan land (1. mynd, svæði 1, 3 og 4). Opnun vörpunnar var 18 x 18 m og möskvastærðin í pöknum 5 x 5 mm. Togtími á einstökum stöðvum var breytilegur, frá nokkrum mínútum upp í eina klukkustund, og togað var á mismunandi dýpi frá 20 m niður á um 50 m, þ.e. þar sem lóðningar sáust á dýptarmæli. Jafnframt voru tekin sýni á 41 stöð með “Tucker 4” háfi, með 2 x 2 m háfopi en möskvastærð í neti var 1 mm. Háfurinn var dreginn eins og áður er lýst og hann var útbúinn með flæðismæli í opi.

Öll sýni úr háfum voru varðveitt í 96% etanóli þar til úrvinnsla þeirra fór fram. Á hverri stöð þar sem loðnulirfur veiddust í flotvörpu voru þær taldar eða fjöldinn uppreiknaður út frá hlutsýni og allt að 50 lirfur lengdarmældar um borð með 0,5 mm nákvæmni. Þá voru jafnframt u.þ.b. 50 lirfur af hverri stöð frystar við -18° C til frekari úrvinnslu í landi.

Í rannsóknastofu voru loðnulirfur greindar og tíndar úr háfsýnunum, þær taldar og allt að 50 á hverri stöð lengdarmældar (staðallengd) með 0,1 mm nákvæmni í myndgreini sem tengdur var víðsjá. Lengd loðnulirfa sem



1. mynd. Staðsetning sýnatökustöðva í apríl, maí og ágúst 2007. Í apríl og maí var notaður 1 m² Tucker háfur, en í ágúst var notuð seiðavarpa (ferningar) og 4 m² Tuckerháfur (fylltir hringir). Á aprílkorti er einnig sýnd skipting hafsvæðisins í fjóra hluta.

Figure 1. Sampling stations in April, May and August 2007. In April and May Tucker trawl with 1 m² opening was used. In August two different sampling gear were used, a pelagic trawl with 18x18m opening (open squares) and a large Tucker trawl with 4 m² opening (filled circles). In the April panel the division of the area into four regions is also shown.

geymdar voru í etanóli var ekki marktækt frábrugðin lengd ferskrar loðnu og lengdin því ekki leiðrétt vegna þessa. Til að meta þéttleika loðnulirfanna í sjónum voru allar fjöldatölur staðlaðar miðað við 1000 m³ síaða. Lirfurnar sem safnað var í flotvörpu voru þíddar og lengdarmældar á sama hátt og lýst er ofar. Alls voru lengdarmældar um 980 lirfur úr aprílleidangri, um 860 úr maíleidangri og um 500 úr ágústleidangri.

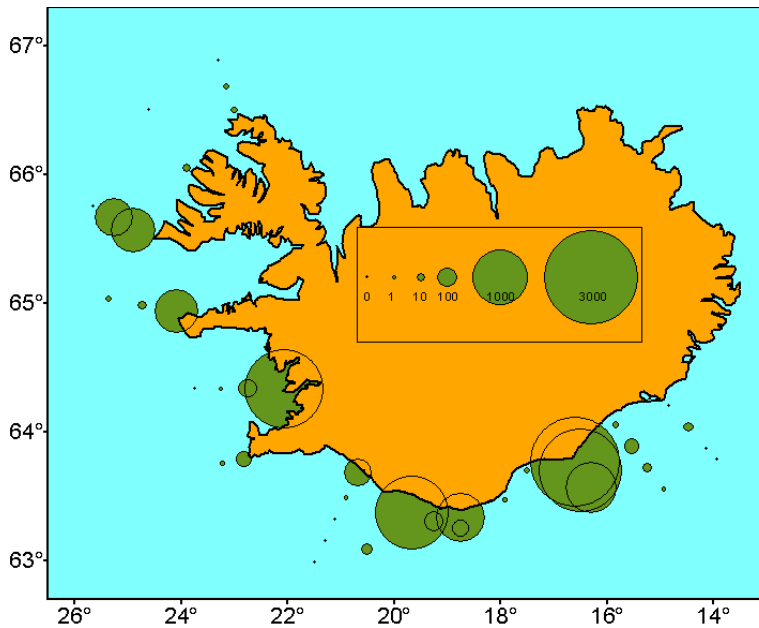
Úr aprílleidangri voru u.þ.b. 40 lirfur af hverju svæði valdar tilviljanakennt úr sýnunum til aldursgreiningar. Úr maíleidangri voru lirfurnar 90 – 100 af hverju svæði en í ágústleidangri veiddust nánast einungis lirfur á svæði 3 í seiðavörpuna og voru 100 lirfur teknar þaðan til aldursgreiningar. Lengdarbil lirfa í aprílleidangri var lítið og skýrir það færri aldursgreiningar innan svæða samanborið við hina leidangrana. Á rannsóknastofu voru kvarnirnar (Sagitta) fjarlægðar og hreinsaðar undir viðsjá í skautuðu ljósi og þær festar með lakki á smásjargler. Þá var ein kvörn frá hverri lirfu slípuð með finum sandpappír (kornastærð 13 µm, 6 µm og 3 µm) niður í kjarnann og dægurbaugar taldir í smásjá með olíulinsu við 1000 x stækkun. Talning var endurtekin þrisvar til fimm sinnum og kvörnin metin ólæsileg og útilokuð ef munur milli talninga var meiri en 10%. Alls voru teknar kvarnir úr 605 lirfum til aldursgreiningar en af þeim reyndust um 6% vera ólæsilegar. Sýnt hefur verið fram á að dægurhringir myndast í kvörnum loðnuungviðis (Gjøsæter & Monstad 1985). Myndun dægurhringa hefst nokkrum dögum (um 10-12), eftir

klak (Campana & Moksness 1991; Ivarjord o.fl. 2008). Hér er því ekki um algildan aldur að ræða, heldur u.þ.b. aldur frá því er kviðpoki klárast (Fortier & Leggett 1985). Til einföldunar verður þó hér eftir talað um fjölda dægurhringja sem aldur.

Lengdardreifing allra loðnulirfa af hverju svæði var borin saman við lengdardreifingu þeirra loðnulirfa sem teknar voru til aldursgreiningar. Þetta var gert með Kolmogorov-Smirnov (KS) prófi og reyndist ekki marktækur munur þar á milli ($p < 0,07$). Þar sem lirfurnar voru ekki allar veiddar á sama degi, var lengd lirfa í hverjum leidangri umreiknuð miðað við ákveðna dagsetningu með því að bæta við eða draga frá meðal dægurvöxt (aldur/lengd) í viðkomandi leidangri (aprílleidangur: viðmiðunardagur 15. apríl, meðalvöxtur á dag 0,27 mm; maíleidangur: 20. maí, 0,43 mm⁻¹; ágústleidangur: 12. ágúst, 0,35 mm⁻¹).

Klakdagur hvernar loðnulirfu var fundinn með því að bakreikna fjölda dægurhringja frá klakhring út í jaðar kvagnar (sem svarar til veiðidags). KS próf var notað til að bera saman klakdagadreifingu og lengdardreifingu á mismunandi svæðum. Ekki var tekið tillit til affalla lirfa á tímabilinu, nema þegar leitað var uppruna loðnulirfanna (13. mynd).

Vöxtur loðnulirfanna á mismunandi svæðum þann tíma sem leið milli leidangrana þriggja var athugaður með ANCOVA-greiningu og Student-Newman-Keuls prófi þar sem bornar voru saman hallatölur og skurðpunktur við y-ás (lengd/aldur).



2. mynd. Útbreiðsla og fjöldi loðnulirfa 12.-18. apríl 2007. Fjöldi lirfa í 1000 m³ af sjó. Veiditæki Tucker háfur með 1 m² opi.

Figure 2. Distribution and density of capelin larvae in the first cruise, April 12-18 2007. Number of larvae in 1000 m³ of sea water. Sampling gear Tucker trawl with 1 m² opening.

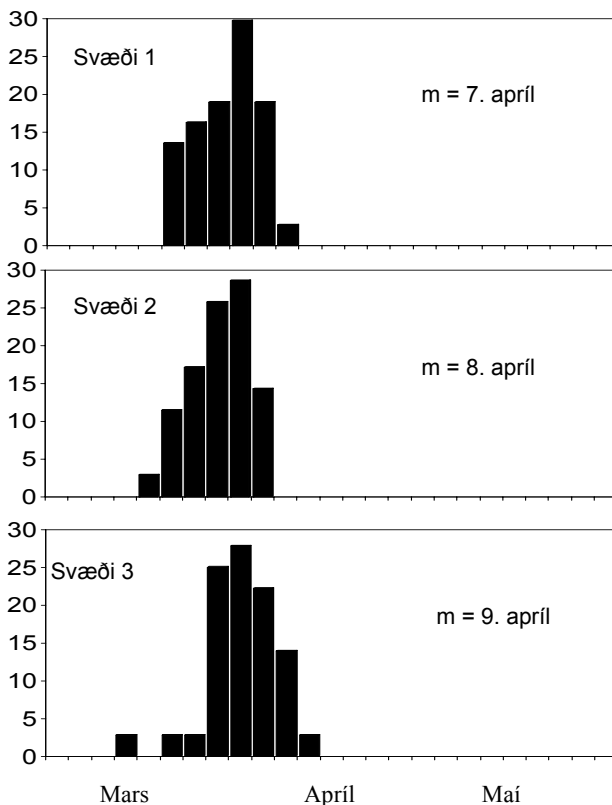
Niðurstöður

Í apríl 2007 fundust loðnulirfur á 30 af 41 stöð þar sem sýni voru tekin. Fjöldi loðnulirfa á þessum stöðvum var allt að 9200/1000m³. Mestur var þéttleikinn í flekkjum á grunnslóð, allt frá Ingólfshöfða vestur um að Látrabjargi (2. mynd). Líklegt er að meginhrygning loðnunnar fari fram á þessu svæði og að tekist hafi að ná utan um meginhlakið, því báðum megin við þetta klaksvæði voru tvö snið stöðva þar sem

fengust mjög fáar lirfur. Nánast allar loðnulirfurnar á svæðum 1 og 3 voru nýklaktar (< 10 mm), en um fjórðungur lirfanna voru ≥10 mm á svæði 2. Þótt lítil munur væri á lengdar-dreifingu lirfa eftir svæðum var hann þó marktækur (KS, $p < 0,01$).

Í apríl var dreifing klakdaga mjög þröng á öllum svæðum eða frá því seint í mars og fram í miðjan apríl (3. mynd; Tafla 1). Nánast allar loðnulirfurnar sem veiddust í apríl voru því nýklaktar og þar sem egginn eru límd við botninn frá hrygningu og þar til þau klekjast, er mikill fjöldi nýklakinna loðnulirfa góð vísbending um hvar loðnan hrygndi.

Dagana 14.-27. maí voru teknar 86 stöðvar og fundust loðnulirfur í 48 sýnum. Fjöldinn var allt að 4100/1000m³ og var þéttleikinn að þessu sinni áberandi mestur úti fyrir norðanverðum Vestfjörðum (4. mynd; svæði 3). Þá fannst töluvert af lirfum við Langanes, Suðausturland og í Faxaflóa. Í maí spannaði lengd loðnulirfanna 5–28 mm. Stærstu lirfurnar voru á suðaustur-svæðinu (5. mynd; svæði 1), en þaðan var nokkuð skýr fallandi í stærð lirfa réttisælis í kringum landið (1. tafla). Við Langanes var áberandi mest af nýklöktum lirfum.



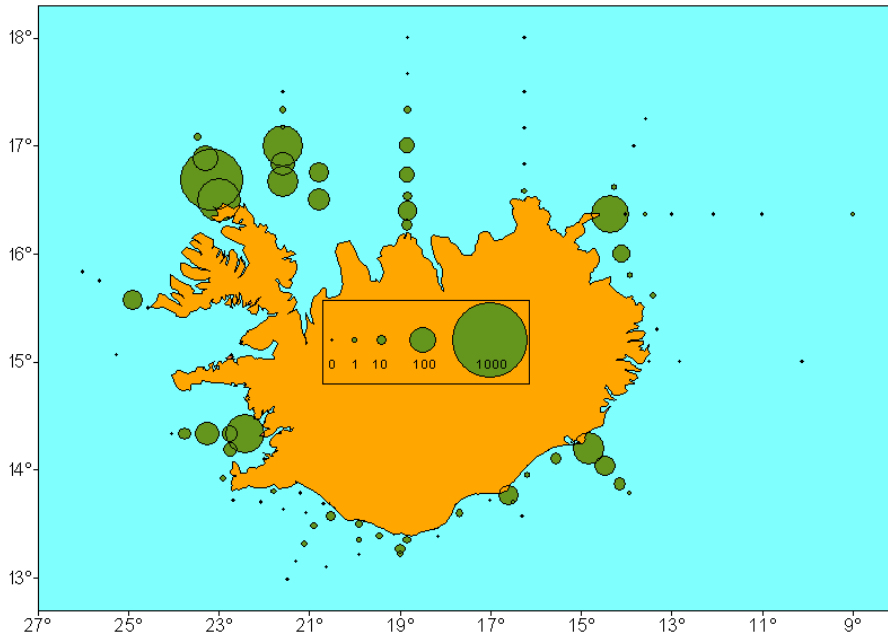
3. mynd. Bakreiknaðir klakdagar loðnulirfa, sem veiddust í apríl 2007. Hvert svæði er sýnt sér (m= meðal klakdagur). Athugið að hægri mörk súluritanna afmarkast af sýnatökunni sem fór fram 12.-18. apríl.

Figure 3. Back-calculated hatch dates of capelin larvae caught in April 2007. Each area shown separately (m=mean hatching day). Note that the cut-off on the right is caused by the time of sampling (April 12-18).

1. tafla. Samantekt á upplýsingum um fjölda, lengd og aldursgreiningu loðnulirfa úr þremur leiðöngrum árið 2007.

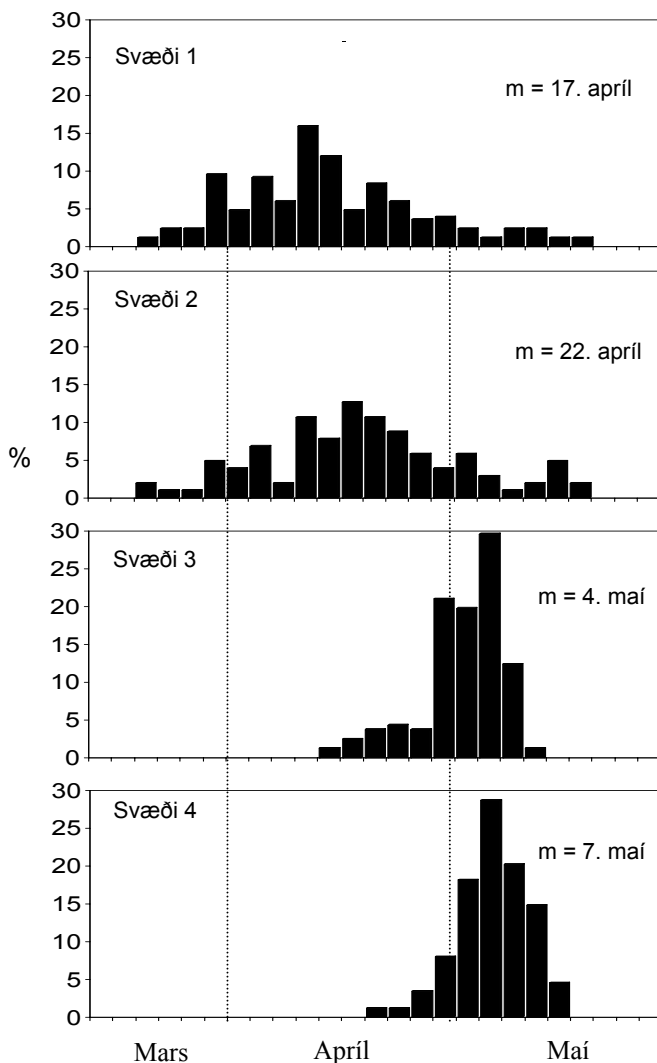
Table 1. Overview of data by area and cruise in 2007.

Svæði/Region	Suðausturland /Southeast	Suðvesturland /Southwest	Norðvesturland /Northwest	Norðausturland /Northeast
Svæðanúmer/Region number	1	2	3	4
Apríl - leiðangur (12.-18.4)				
April cruise				
Fjöldi stöðva (Tucker háfur) /Number of stations (Tucker 1)	13	16	12	
Fjöldi loðnulirfa í fjórðungi /Number caught in region	6107	5352	1740	
Fjöldi aldursgreindur /Number aged	37	35	36	
Meðallengd í leiðangri (mm) /Average length in cruise	7,7 ± 1,3	8,2 ± 1,5	7,3 ± 0,9	
Meðallengd í aldursgreiningu (mm) /Av. length of aged larvae	7,2 ± 4,1	8,2 ± 4,0	7,5 ± 1,0	
Aldursspönn (d) /Age span	3 - 21	2 - 17	1 - 19	
Meðalklakdagur (dagsnúmer) /Av. hatchdate (day of year)	97 ± 4	98 ± 4	99 ± 4	
Mái - leiðangur (14.-27.5)				
May cruise				
Fjöldi stöðva (Tucker háfur) /Number of stations (Tucker 1)	15	27	25	19
Fjöldi loðnulirfa í fjórðungi /Number caught in region	298	499	1082	274
Fjöldi aldursgreindur /Number aged	84	103	86	88
Meðallengd í leiðangri (mm) /Average length in cruise	19,2 ± 4,2	16,2 ± 5,6	10,9 ± 2,1	9,8 ± 2,5
Meðallengd í aldursgreiningu (mm) /Av. length of aged larvae	20,9 ± 5,3	18,0 ± 4,1	10,9 ± 3,6	9,9 ± 3,4
Aldursspönn (dagar) /Age span	6 - 63	7 - 53	6 - 32	5 - 29
Meðalklakdagur (dagsnúmer) /Av. hatchdate (day of year)	107 ± 13	112 ± 13	124 ± 11	127 ± 6
Ágúst - leiðangur (8.-26.8)				
August cruise				
Fjöldi stöðva (seiðavarpa) /Nr. of stations (pelagic trawl)	4		26	14
Fjöldi loðnulirfa í fjórðungi /Number caught in region	0		56815	4570
Fjöldi aldursgreindur /Number aged			92	
Meðallengd í leiðangri (mm) /Average length in cruise			49,2 ± 8,8	
Meðallengd í aldursgreiningu (mm) /Av. length of aged larvae			49,9 ± 9,4	
Aldursspönn (dagar) /Age span			71 - 169	
Meðalklakdagur (dagsnúmer) /Av. hatchdate (day of year)			138 ± 26,9	
Fjöldi stöðva (Tucker4) /Nr. of stations (Tucker 4)	0	6	31	4
Fjöldi loðnulirfa í fjórðungi /Number caught in region	-	11	448	10
Meðallengd í leiðangri (mm) /Average length in cruise	-	19,7 ± 4,0	23,7 ± 6,7	24,8 ± 7,2



4. mynd. Útbreiðsla og fjöldi loðnulirfa 14.-27. maí 2007. Fjöldi lirfa í 1000 m³ af sjó. Veiditæki 1 m² Tucker háfur.

Figure 4. Distribution and density of capelin larvae during the second cruise, May 14-27 2007. Number of larvae in 1000 m³ of seawater. Sampling gear Tucker trawl with 1 m² opening.



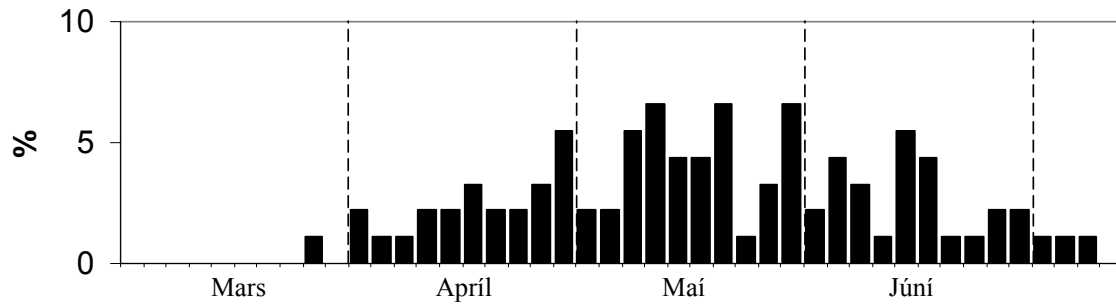
Ekki var marktækur munur á klakdagadreifingu loðnulirfa á svæðum 1 og 2 ($p < 0,10$) en hinsvegar var töluverður og marktækur ($p < 0,001$) munur milli þessara svæða og norðursvæðanna (5. mynd). Á suðursvæðunum klöktust lirfurnar út frá miðjum mars og fram í miðjan maí. Lirfurnar sem veiddust úti fyrir Vestfjörðum (svæði 3) klöktust hins vegar út frá því um miðjan apríl og fram í miðjan maí. Yngstu lirfurnar voru úti fyrir Langanesi, en þær klöktust út í fyrri hluta maí. Marktækur munur var einnig á dreifingu klakdaga milli norðursvæðanna ($p < 0,001$).

Í ágúst voru loðnulirfur veiddar með tvenns konar veiðarfærum. Annars vegar var veitt í seiðavörpu, sem er veiðarfæri af allt annarri stærð og gerð en lirfuháfar. Hins vegar var notuð stærri útgáfa af lirfuháfi, svokallaður Tucker4 háfur, sem er fjórfalt stærri en Tucker1, sem áður var notaður, en hliðstæður að allri gerð. Alls voru teknar 44 stöðvar með seiðavörpu á þremur svæðum og fundust loðnulirfur á 6 stöðvum (6. mynd). Fimm af þessum stöðvum voru á tiltölulega litlu svæði nokkuð djúpt undan Norðurlandi en jafnframt fundust lirfur á einni stöð, nær landi norður af Þistilfirði. Fjöldi lirfa á djúpslóðinni var á bilinu 4100 – 24300 lirfur/sjómílu, sem svarar til 7–41* lirfu í

5. mynd. Bakreiknaðir klakdagar loðnulirfa, sem veiddust í maí 2007. Hvert svæði er sýnt sér (m =meðalklakdagur).

Figure 5. Back-calculated hatch dates of capelin larvae caught in May 2007. Each area is shown separately (m =mean hatching day).

*Tölurnar eru ekki alveg sambærilegar þar sem seiðavarpan er dregin á því dýpi þar sem lóðningar hafa sést.



7. mynd. Bakreiknuð klakdagadreifing loðnulirfa úr seiðavörpu í ágúst 2007 (svæði 3-4 saman). Hæð súlnanna er ekki leiðrétt fyrir afföllum.

Figure 7. Back-calculated dates of hatching of capelin larvae caught in pelagic trawl in August 2007 (areas 3-4 combined). Note that the numbers are not corrected for mortality.

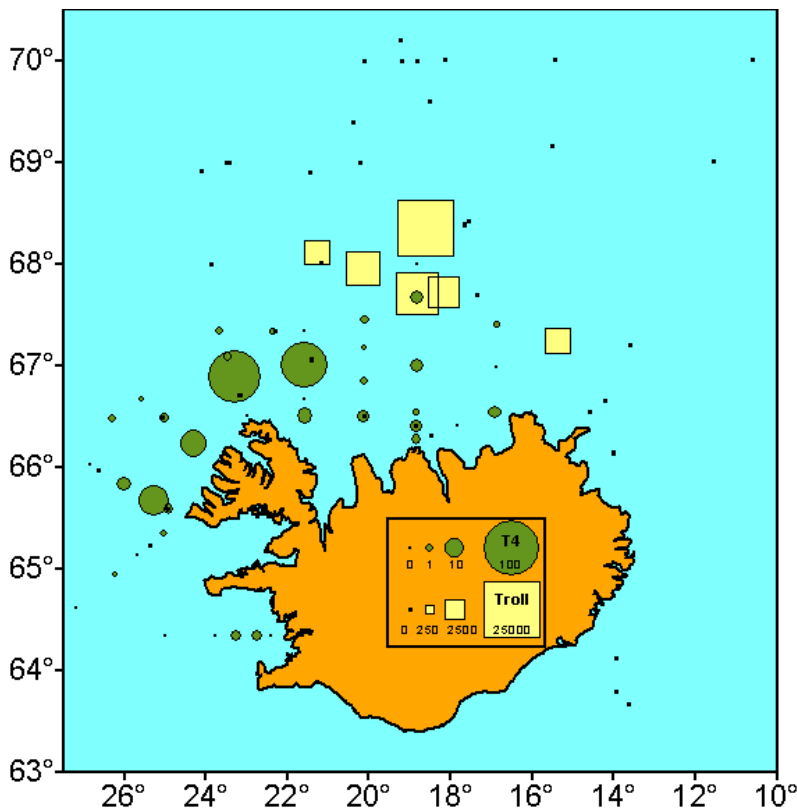
1000 m³. Lengdardreifingin var á bilinu 26–65 mm.

Í þau 34 ár sem seiðaleiðangrar voru farnir (1970-2003), var notuð hliðstæð Harstad flotvarpa, með finriðnum poka (5 mm). Það lá því beint við að velja sýni til aldurslesninga úr seiðavörpunni og voru lesnir dægurhringir í kvörnum um 100 lirfa. Klakdagadreifing lirfanna var mjög víð (7. mynd). Elstu lirfurnar klóktust út í lok mars en þær yngstu í byrjun júlí.

Í ágústleiðangrinum voru einnig tekin sýni með Tucker 4 háfi á 41 stöð (6. mynd). Tucker4 háfurinn er fjórum sinnum stærri en Tucker1 og með grófari möskva (1 mm), enda eru loðnu-

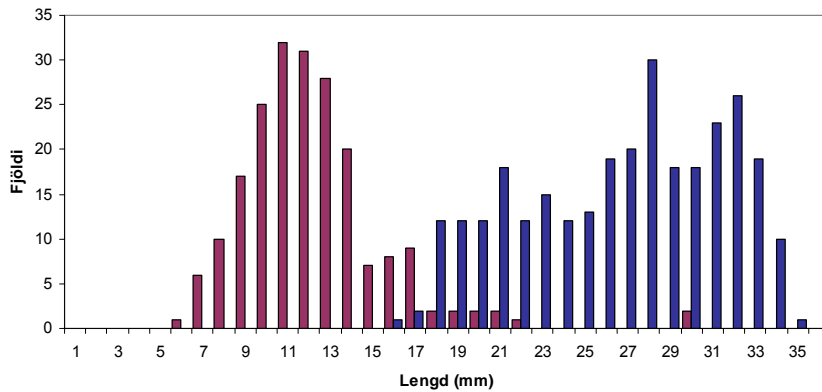
lirfurnar orðnar mun stærri og hraðsyndari í ágúst heldur en að vori. Háfarnir tveir eru að öðru leyti sambærilegir og Tucker4 háfurinn gefur betri vísbendingu en seiðavarpan um fjölda smárra loðnulirfa, en stærri lirfur ná að forðast hann. Seiðavarpan nær hins vegar auðveldlega stærstu loðnulirfum, en smærri lirfur smjúga út um möskvana í belg vörpunnar. Í Tucker-háfinn fékkst mest af loðnulirfum vestur og norður af Vestfjörðum 20–87 lirfur í 1000 m³ (6. mynd).

Á 8. mynd er lengdardreifing allra loðnulirfa frá öllum Tucker4-stöðvum samtals, borin saman við lengdardreifingu allra lirfa frá öllum seiðavörpustöðvum samtals. Lirfurnar, sem



6. mynd. Útbreiðsla og fjöldi loðnulirfa 8. - 26. ágúst 2007. Grænir hringir: fjöldi lirfa í 1000 m³ af sjó, 4 m² Tucker háfur. Gulir fernigar: Fjöldi lirfa á togmílu, seiðavarpa (opnun 18 x 18 m).

Figure 6. Distribution and density of capelin larvae, August 8 - 26 2007. Green filled circles: number of larvae per 1000 m³ in Tucker trawl with 4 m² opening. Yellow filled squares: Number of larvae per nautical mile in pelagic trawl with opening 18 x 18 m.



8. mynd. Lengdardreifing loðnulirfa í ágúst 2007. Rauðar súlur sýna loðnulirfur sem veiddust í Tucker 4 háf með 1 mm möskva, en bláar súlur loðnulirfur úr seiðavörpu með 5 mm möskva.

Figure 8. Length distribution of capelin larvae in August 2007. Red columns: Tucker 4 (mesh size 1 mm), blue columns: pelagic trawl (mesh size 5 mm).

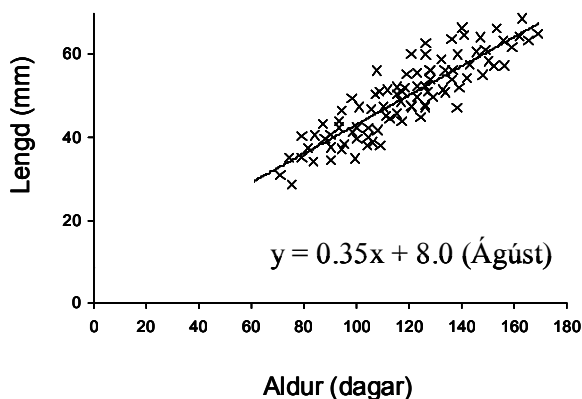
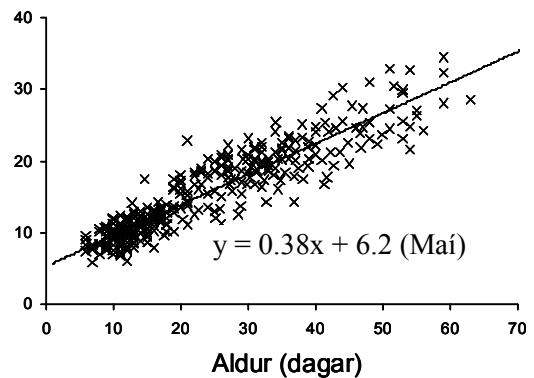
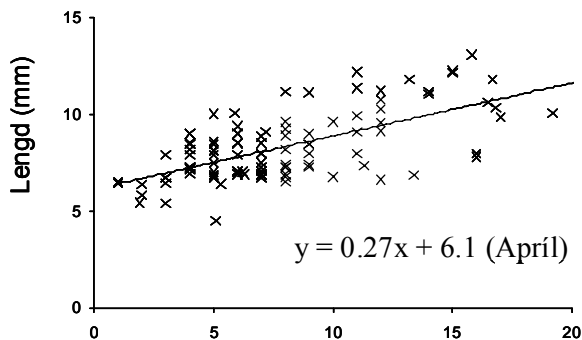
komu í Tucker 4 háfinn voru mun smærri en þær sem veiddust í seiðavörpunum og skaraðist lengdardreifingin mjög lítið.

Marktækur munur var á vaxtarhraða loðnulirfanna í apríl og maí (ANOVA; $p < 0,001$), en samanburður við lirfurnar sem veiddust í ágúst er tæpast raunhæfur vegna aldursmunar (9. mynd). Ekki var marktækur munur á vaxtarhraða loðnulirfa eftir svæðum í apríl (ANCOVA; $F = 1,8$, $df = 2$; $p = 0,317$) en þá var meðalvöxtur fyrir öll svæðin $0,27 \text{ mm d}^{-1}$. Í maí var hins vegar marktækur munur á vexti eftir svæðum ($F = 35,6$, $df = 3$, $p < 0,0001$). Svipaður vöxtur var á svæðum 1 og 2 ($0,41$ og $0,43 \text{ mm d}^{-1}$) en vöxturinn var hins vegar nokkru hægari á norðvestur- og norðaustursvæðunum ($0,37$ og

$0,29 \text{ mmd}^{-1}$). Vaxtarhraði lirfa, sem veiddust með seiðavörpu á svæði 3 í ágústleiðangrinum, var að meðaltali $0,35 \text{ mmd}^{-1}$ (9. mynd).

Umræða

Aldursgreiningar sýna að stærðarmun loðnulirfa eftir svæðum megi að stærstum hluta rekja til mismunandi aldurs en ekki breytilegs vaxtarhraða eftir sjávarhita. Mestur hluti þeirra loðnulirfa sem veiddust úti fyrir Norður- og Austurlandi í maí 2007 voru nýklaktar (5. mynd). Þær höfðu því klakist út allt að mánuði síðar en loðnulirfur úti fyrir Suður- og Vesturlandi. Niðurstöðurnar benda til þess að loðnulirfur á Norður- og Austursvæðunum eigi að stórum hluta uppruna sinn að rekja til



9. mynd. Samband lengdar og aldurs eftir leiðöngnum. Frá vinstri, loðnulirfur í apríl (Tucker1), maí (Tucker1) og ágúst (seiðavarpa). Athugið mismunandi skala á ásum.

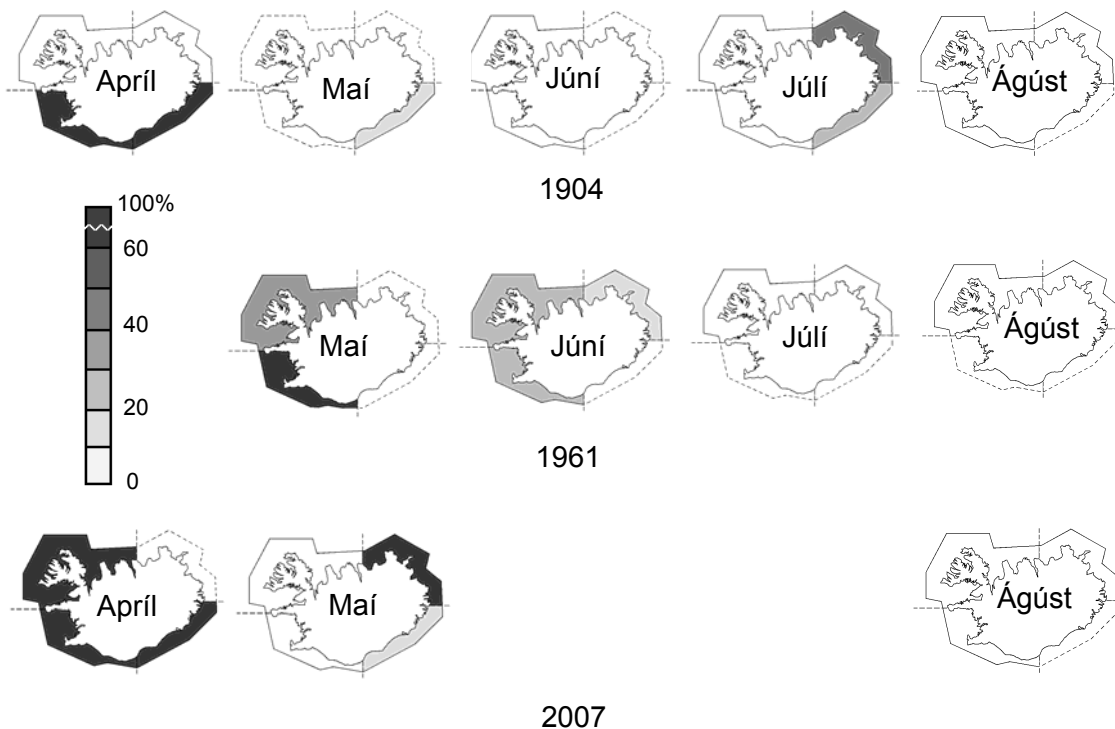
Figure 9. Length-age relationship by surveys. From left to right, larvae caught in April (Tucker1), May (Tucker1) and August (pelagic trawl). Note different scales.

staðbundinnar hrygningar og að rek lirfa frá Suðurmiðum inn á Norðursvæðið hafi verið takmarkað árið 2007. Við um 7° botnhita fyrir sunnan land tekur það loðnuhrognin um 3 vikur að klekjast, en við um 1-2° botnhita, eins og algengt var við Norður- og Austurland vorið 2007 (Anon. 2008), tekur klakið 5-7 vikur (Frank and Leggett, 1981). Líklegt er því að að hrygning eigi sér stað á svipuðum tíma allt í kring um landið, en egginn klekist út mun síðar við Norður- og Austurland vegna lágs botnhita þar.

Viðtekin skoðun er að meginhrygning loðnustofnsins fari fram við Suður- og Vesturland og þaðan berist ungvíðið inn á svæðin fyrir norðan og austan land (Hjálmar Vilhjálmsson 1994). Ýmsar rannsóknir hafa þó sýnt að hrygning á sér einnig stað við Norður- og Austurland (Jespersen 1920, Jutta Magnússon 1966, Eyjólfur Friðgeirsson 1979, Hjálmar Vilhjálmsson 1994), en almennt hefur verið álitnið að hrygning á þessum svæðum skipti litlu máli fyrir stofninn. Niðurstöður þessarar rannsóknar sýna hinsvegar að talsverð hrygning átti sér stað allt í kringum landið vorið 2007. Í maí kemur fram skýr fallandi í stærð ungvíðis

frá suðaustursvæðinu réttisælis í kringum landið til norðaustursvæðisins. Vöxtur loðnulirfa á norður- og austursvæðunum er nokkru minni en á suður- og vestursvæðunum og má gera ráð fyrir að hitamunur sjávar ráði þar einhverju um, en einkum þó fæðuframboð (sjá neðar). Munur í vaxtarhraða er þó ekki svo mikill að það skýri nema brot af stærðarmuninum. Klakdaga-dreifing loðnuungviðisins sýnir að uppruna þess má rekja til mismunandi hrygningarsvæða og stærðarmunurinn er fyrst og fremst vegna þess að loðnulirfurnar eru yngri fyrir norðan og austan land.

Vöxtur loðnuungviðis í þessari rannsókn var svipaður og kom fram í rannsókn Önnu Ólafsdóttur og John Anderson á íslenskum loðnulirfum (Ólafsdóttir & Anderson 2010). Þar kom fram nokkur munur í vexti eftir árum en meðalvöxtur loðnulirfa við Ísland var um 0,3 mmd⁻¹ árið 2001 en 0,4 mmd⁻¹ ári seinna. Þá er vöxtur loðnuungviðis við Nýfundnaland, 0,35 mmd⁻¹ (Frank og Carscadden 1989), og í Barentshafi, 0,33 mmd⁻¹ (Jakobsen o.fl. 2004), áþekkur vexti loðnuungviðis við Ísland, eða 0,27-0,43 mmd⁻¹. Rannsóknir hafa sýnt að mismundandi vaxtarhraða loðnuungviðis má aðallega rekja til



10. mynd. Hlutfallslegur fjöldi nýklakinna loðnulirfa eftir svæðum árin 1904 (Jespersen, 1920), 1961 (Jutta Magnússon, 1966) og nú seinast árið 2007. Strikalinur tákna að engin sýnataka hafi farið fram í þeim fjórðungi. Athugið að á skalanum þýðir hvítt að engar nýklaktar loðnulirfur veiddust, en dekksti grái liturinn, að 60-100 % lirfanna voru nýklaktar.

Figure 10. Proportion of newly hatched capelin larvae in each area in the years 1904 (Jespersen 1920) 1961 (Magnusson 1966) and 2007 (present data). Broken lines indicate quadrants with no sampling. Note that on the BW-scale, white means no newly hatched larvae and the darkest grey shade that 60-100% of the larvae were newly hatched.

mismunandi framboðs á fæðu (Moksness 1982, Frank & Legget 1982, 1986).

Samanburður við fyrri rannsóknir

Fyrsta skipulega söfnun á fisklirfum umhverfis Ísland fór fram á árabílinu 1903-1908. Markmið leiðangranna var að greina tegundir og lýsa þeim (Schmidt 1906), en ítarlegri úrvinnsla á sýnunum leiddi síðar í ljós nánari upplýsingar um útbreiðslu loðnu- og síldarlirfa við landið (Jespersen 1920). Næsta stóratök í rannsóknum á loðnulirfum var unnið upp úr átusýnum sem safnað var á árunum 1960-1964 í tengslum við síldarrannsóknir (Jutta Magnússon 1966).

Sýnataka í framangreindum rannsóknum náði yfir einn til fimm mánuði hvert ár, á tímabilinu frá apríl til september og í hverjum mánuði náði sýnatakan til eins til fjögurra áður-nefndra fjórðunga af Íslandsmiðum. Hér hafa þéttustu sýnatökuárin úr þessum rannsóknum (1904 og 1961), verið valin til samanburðar við okkar rannsóknir. Markmiðið er að fá yfirlit yfir hrygningu loðnu við landið og kanna hvort breytingar hafi orðið á tímasetningu og útbreiðslu hrygningarinnar á síðastliðinni öld.

Hrogn loðnunnar límast við sandkorn á botninum og berast því ekki með straumi. Loðnulirfurnar klekjast því út á hrygningarstaðnum um 3-6 vikum eftir hrygningu. Jespersen (1920) gat því notað útbreiðslu minnstu loðnulirfanna (<10mm), til að áætla staðsetningu og stærð hrygningarsvæða. Til samanburðar verður hér einnig miðað við sama lengdarbil (5-9 mm), til að afmarka nýklaktar loðnulirfur. Í apríl fann Jespersen (1920) nýklaktar lirfur einungis við Suðurland og þar fundust áfram nýklaktar lirfur fram í júlí (10. mynd).

Að teknu tilliti til fösturþroskans, fór því aðalhrygning loðnunnar fram við Suðurland í mars-apríl árið 1904. Á öðrum svæðum en suðurmiðum virðist hrygning hafa verið minni. Óvíst er hvort einhver hrygning var á norðurmiðum í apríl eða maí, því engin sýni eru til frá þeim slóðum í maí árin 1903-08. Hugsanlega bendir útbreiðslumunstur klaksins til staðbundinnar hrygningar í júní á austurmiðum.

Á árunum 1960-1964 var sýnataka að mestu einskorðuð við norðurmið, en náði þó suður á suðvesturmið í maí og júní sum árin (10. mynd). Þótt mælingar frá apríl skorti, bendir stærðardreifing loðnulirfa í maí 1961 sterklega til þess að klak hafi þegar verið byrjað í apríl úti fyrir

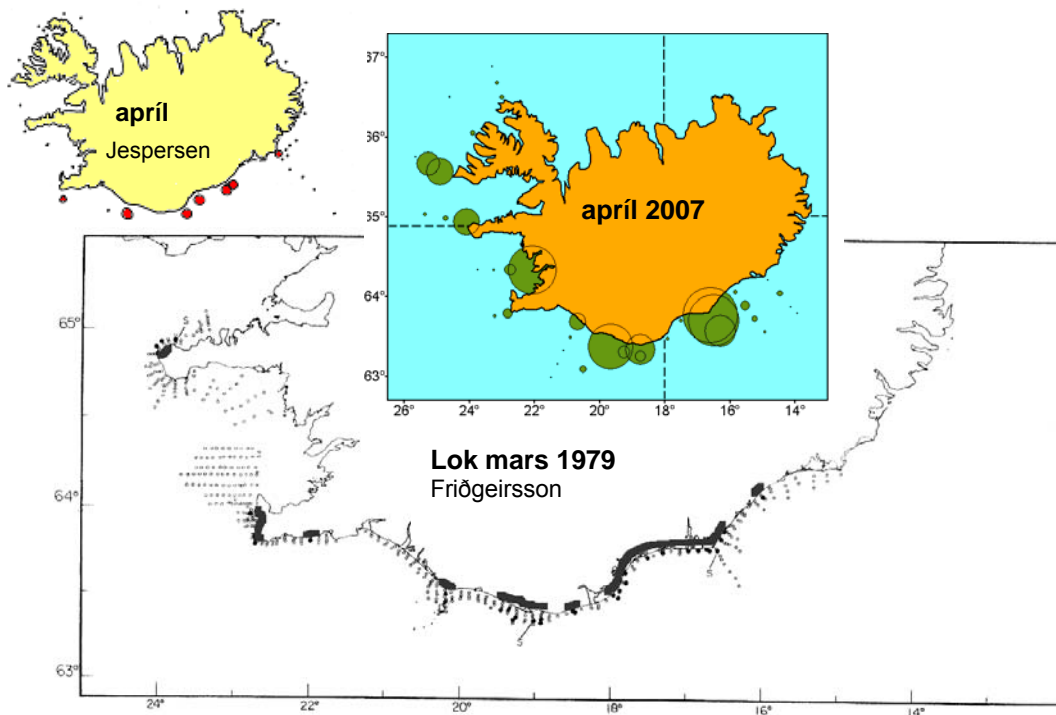
öllu Vesturlandi og vestanverðu Suðurlandi. Á sama hátt má draga þá ályktun að loðnulirfur hafi klakist út í maí úti fyrir Norðurlandi. Hrygning hefur því væntanlega átt sér stað í mars-apríl við Suður- og Vesturland og apríl við Norðurland. Mjög lítið var um hrygningu norðaustan og austan lands á árunum 1960-64 (Jutta Magnússon 1966).

Í þessari rannsókn voru nánast allar lirfur í apríl á svæðum eitt til þrjú nýklaktar, þannig að meginhrygningin hefur átt sér stað fyrir Suður- og Vesturlandi í mars-apríl 2007 (10. mynd). Seint í maí virtist klak vera í hámarki við Norðausturland, sem þýðir að þar átti hrygning sér stað í apríl (5-7 vikum áður, við 1-2°C). Ekki eru til mælingar frá júní og júlí 2007, en í ágúst var allt klak um garð gengið, líkt og í fyrri rannsóknum.

Auk ofangreindra rannsókna var gert átak í loðnulirfurannsóknum árin 1976-1979. Flest árin fundust nýklaktar loðnulirfur meðfram allri suður og vesturströndinni í apríl-maí, en þó ekki meðfram Vesturlandi árið 1978 (Eyjólfur Friðgeirsson 1979). Þrátt fyrir ítarlega leit í maí og júní 1979 fundust engar loðnulirfur úti fyrir Norður- og Austurlandi, en 1979 var reyndar óvenjukalt ár (Anon. 2008).

Seinni hluta marsmánaðar árið 1979 var leitað að loðnuhrognum í seti víða við suður og vesturströndina (11. mynd). Loðnuhrogn fundust víða í setsýnum austan frá Meðallandsbug og vestur að Vestmannaeyjum. Einnig fundust loðnuhrogn sunnan og vestan Reykjanes og við utanvert Snæfellsnes (Eyjólfur Friðgeirsson 1979).

Niðurstöður lirfurannsókna Jutta Magnússon (1966) og Eyjólf Friðgeirssonar (1979) benda báðar til þess að meginhrygning loðnu að vori sé meðfram allri suður- og vesturströndinni. Setrannsóknir Eyjólf Friðgeirssonar (1979) og Kjartans Thors (1981) styðja einnig þessa mynd. Jespersen (1920) varð hins vegar ekki var við loðnuklak fyrir vesturlandi, og að hans mati nær meginhrygningin því einungis meðfram suðurströndinni. Við fyrstu sýn er því freistandi að ætla að hrygningin hafi breyst frá því skömmu eftir aldamótin 1900, þegar bæði lofthiti og sjávarhiti voru lægri hér við land en nú á tímum. Þó má geta þess að hlýsjávartegundin makrill fannst í torfum fyrir norðan land árið 1904. Aprílöggn Jespersen (1920) eru þó einungis frá einu ári (1904) og því er ekki er hægt að útiloka að hrygning fyrir vesturlandi geti verið lítil eða engin einstök ár (líkt og var á



11. mynd. Stóra myndin sýnir hvar leitað var að loðnuhrognum í seti (litlir hringir) og hvar loðnuhrogn fundust (breið svört lína) í rannsóknum Eyjólf Friðgeirssonar í marslok 1979. Til samanburðar er sýnt á innfeldri mynd hvar nýklaktar loðnulirfur fundust í apríl 2007. Efst í vinstra horni er einnig sýnt hvar Jespersen fann nýklaktar loðnulirfur í apríl 1904 (stórir rauðir deplar úti fyrir suðurlandi). Takið eftir að nokkrir sýnatökustaðir eru úti fyrir öðrum landshlutum 1904 (litlir punktar), en þar fengust engar loðnulirfur svo snemma árs.

Figure 11. The main figure shows sediment sampling stations (small circles) and where capelin eggs were found in the sediment (filled circles and thick black line). Data collected in late March 1979 by Friðgeirsson (1979). The distribution of newly hatched capelin larvae caught in April 2007 is shown in the insert for comparison. In the uppermost left corner is an insert showing where newly hatched capelin larvae were found (red filled circles at the south coast) in April 1904 (Jespersen 1920). Note few sampling stations in other quadrants (small black dots) where no capelin larvae were found this early in the year 1904.

árunum 1970 og 1978), án þess að um langtíma-breytingu sé að ræða. Vísbendingar eru um að hrygning norðan lands geti einnig brugðist einstök (köld?) ár, líkt og vorið 1979 (Eyjólfur Friðgeirsson 1979).

Þessi rannsókn sýnir svipað munstur loðnuhrygningar og fyrri rannsóknir, þ.e. meginhrygningu í mars-apríl meðfram Suður- og Vesturlandi, en útbreiðslan nær lengra til norðurs 2007 en sum fyrri ár. Árið 2007 fundust nýklaktar loðnulirfur við Norðaustur- og Austurland seint í maí, sem bendir til hrygningar þar í apríl. Erfitt er að finna hliðstæðu í eldri gögnum, nema ef vera kynni frá júní 1961, þar sem meðallengd lirfa var orðin 14.7 mm í maí (Jutta Magnússon 1966), sem bendir til klaks í apríl-maí og hrygningar í mars-apríl.

Útbreiðsla loðnuseiða var könnuð árlega í ágúst á árabílinu 1970-2003 (sbr. árlegar skýrslur Hafrannsóknastofnunarinnar um seiða-

leiðangra). Ef þessari mæliseríu er skipt upp í tvö jafnlöng tímabil má sjá greinilega tilfærslu á útbreiðslu loðnulirfa til norðurs, eins og fram kemur í 2. töflu. Hugsanleg skýring er að aukið innstreymi Atlantssjávar á Norðurmið og hlýnun þar síðan 1997 (Anon. 2010), hafi borið lirfurnar norðar. Hins vegar éta þorsk- og ýsuseiði loðnulirfur og það var óvenju mikið af þorsk- og ýsuseiðum úti af Norður- og Austurlandi í ágúst, á árabílinu 1997-2003. Þótt þéttleiki þorsk- og ýsuseiða hafi verið langmestur á landgrunninu þessi ár, teygði útbreiðsla þeirra sig oft norður undir 68°N (sbr. árlegar skýrslur Hafrannsóknastofnunarinnar um seiðaleiðangra). Ekki er ólíklegt að þetta hvort tveggja eigi hér hlut að máli.

Afli í seiðavörpu í ágúst 2007 var í samræmi við þessa þróun, þ.e. að stærstu loðnulirfurnar (meðallengd 49 mm), fundust nær engöngu langt norður í hafi. Hins vegar sýna háfsýni (Tucker 4), að talsvert var af smærri loðnu-

2. tafla. Ár sem að meðaltali gáfu meira en 1000 loðnulirfur á togmílu í seiðatroll (á 68°N eða norðar) *. Gögn úr árlegum seiðaleiðöngnum Hafrannsóknastofnunarinnar 1970-2003. Þremur árum seríunnar er sleppt, þar sem ekki var hægt að dæma um útbreiðslu loðnulirfa norðan við 68°N.

Table 2. Years with more than 1000 capelin larvae per nautical mile caught in the pelagic trawl at northerly stations ($\geq 68^\circ\text{N}$)*. Data from the annual 0-group surveys by the Marine Research Institute 1970-2003. Three years of the series were omitted since the distribution north of 68°N could not be estimated.

1970-1986

12 ár/12 years $<10^3$

3 ár/3 years $>10^3$

1987-2003

4 ár/4 years $<10^3$

12 ár/12 years $>10^3$

lirfum (meðallengd 24 mm) vestur, en einkum norður, af Vestfjörðum.

Mögulegur uppruni 0-grúppu loðnu

Með því að bera saman klakdagadreifingu frá apríl og maí annars vegar og hins vegar frá ágúst, má hugsanlega skýra að einhverju leyti uppruna eftirlifandi 0-grúppuseiða að hausti.

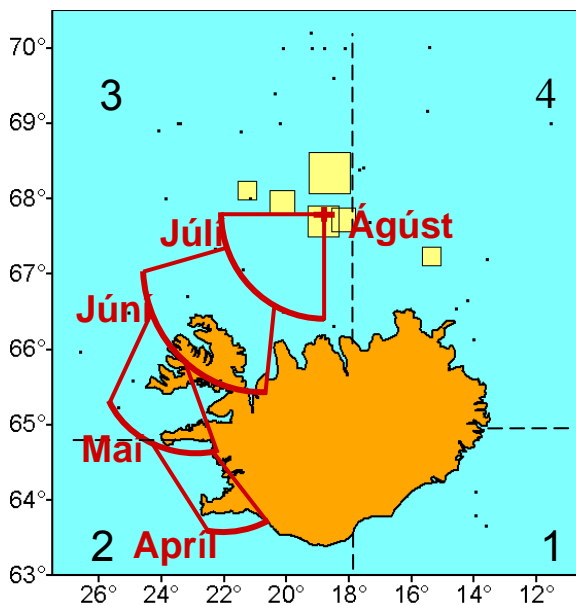
Algengur straumhraði í yfirborðslögum á reksslóð loðnulirfa, hvort sem er í strandstraumi við suðvesturland eða í hlýsjávar tungunni á norðurmiðum virðist vera um 3-4 sjómílar á dag (Unnsteinn Stefánsson 1999). Endurteknar mælingar á útbreiðslu loðnulirfa að vori árin 1976-1979 (Eyjólfur Friðgeirsson 1979), benda þó til að raunverulegur rekhraði loðnulirfanna hafi að meðaltali einungis verið um 2 sjómílar á

dag. Sundhreyfingar smárra loðnulirfa (< 20 mm) að vori hafa lítil eða engin áhrif á heildarflutninginn (Batty 1984). Sundgeta stærri loðnulirfa gæti hins vegar (a.m.k. fræðilega), haft einhver áhrif á rekstefnu og/eða rekhraða, ef ávallt er synt í rétta átt. Hér er valið að fara meðalveg og áætla meðalrekhraða loðnulirfanna 3 sjómílar á dag.

Að gefnum þessum forsendum, má velta fyrir sér uppruna loðnulirfanna sem lifað höfðu af sumarið og veiddust í seiðavörpu djúpt norður af landinu í ágúst (12. mynd, gulir ferningar). Samkvæmt áætluðum rekhraða, á klak frá svæði 1 (suðausturmið), enga möguleika á að enda djúpt norður af landinu í ágúst. Til þess þyrftu lirfurnar að klekjast út í janúar eða febrúar (12. mynd). Vegna réttsælis flæðis helstu strauma við landið á klak frá svæði 4, einnig mjög takmarkaða möguleika á að enda í aðalfleknum í ágúst. Vangaveltur um uppruna ágústlirfanna munu því einskorðast við klak frá svæðum 2 og 3, þ.e. frá suðvesturmiðum og norðvesturmiðum. Til að auðvelda samanburð á klakdögum eru lirfur veiddar í apríl settar lengst frá miðju á 13. mynd, síðan maílirfur nær miðju og ágústlirfur á miðri mynd. Rauðar súlur eru frá suðvestursvæði, en bláar frá norðvestursvæði.

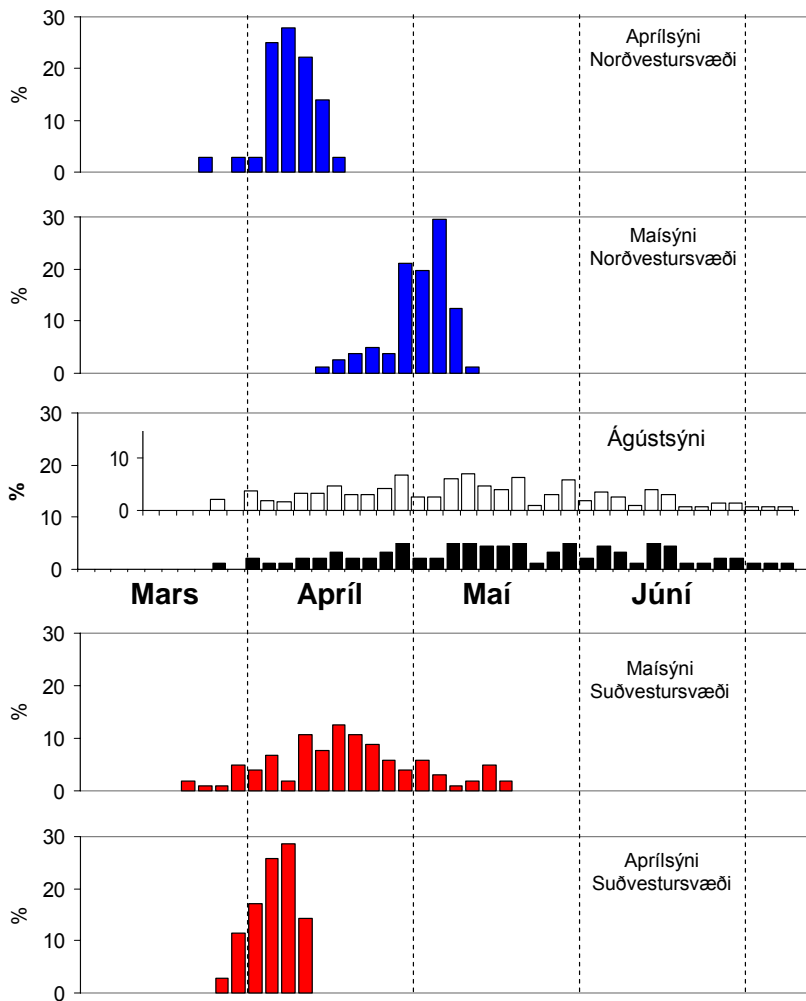
Þær loðnulirfur, sem veiddust á suðvesturmiðum í apríl klöktust út seint í mars og byrjun apríl (13. mynd, rauðar súlur neðst). Fulltrúar þessa klakhóps komu aftur fram í maísýnum mánuði seinna (13. mynd, rauðar súlur næst-neðst). Þessi hópur skilar sér frekar illa í Íslandshaf í ágúst, sérstaklega mars-lirfurnar (svartar súlur á miðri mynd), en þó eitthvað betur ef reiknað er með 3,5% afföllum á dag (Pedersen o.fl. 2009), 13. mynd, hvítar súlur í miðju.

Klak á norðursvæðinu hefst 1-2 vikum seinna en á suðursvæðinu (13. mynd, bláar súlur efst). Hins vegar er apríllakið, sem kemur greinilega fram í aprilsýnum með öllu horfið í



12. mynd. Hugsanleg upprunasvæði loðnulirfa, sem veiddust í seiðavörpu í ágúst (gulir ferningar) miðað við 3 mílna meðalrekhraða á sólarhring. Loðnulirfur, sem klöktust út í apríl við Reykjanes gætu því hafa náð krossinum í ágúst.

Figure 12. Possible origin of capelin larvae caught with pelagic trawl in August (yellow squares) assuming an average drift speed of 3 nautical miles per 24 hours. Capelin larvae that hatched around Reykjanes peninsula in April may thus have reached the cross in August.



13. mynd. Bakreiknaðir klakdagar loðnulirfa sem veiddust í ágúst eru sýndir á súluritunum í miðjunni (svartar súlur = óleiðrétt, hvítar súlur = leiðrétt fyrir áætluðum af-föllum, 3,5% á dag). Til samanburðar eru sýndir klakdagar loðnulirfa sem veiddust í apríl og maí á svæðum 2 og 3. Fyrir ofan miðju eru klakdagar loðnulirfa, sem veiddust úti fyrir Norðvesturlandi (svæði 3), en fyrir neðan miðju eru klakdagar loðnulirfa sem veiddust úti fyrir Suðvesturlandi (svæði 2).

Figure 13. Back-calculated hatch dates of capelin larvae caught in August are shown in the middle panel (black columns = uncorrected, white columns = corrected for 3.5% mortality per day). For comparison hatch date distributions for larvae caught in April and May in areas 2 and 3 are also shown. The uppermost two panels show larvae caught in area 3 (Northwest) in April and May. The lowest two panels show the larvae caught in area 2 (Southwest) in April. Lowest panel = larvae caught in April, next panel = same area (2) in May.

maí (13. mynd, bláar súlur næst efst). Tvær skýringar koma hér til greina. Annars vegar að apríllak hafi alveg misfarist, en þá væri uppruni nær alls apríllaks á suðvesturmiðum. Hin skýringin er að vegna þess hve langt er á milli sniða á þessu svæði í vorleiðangri, hafi flekkurinn við Látrabjarg í apríl (2. mynd) ekki náð inn á Kögursniðið í maí (4. mynd), en vegalengdin er um 80 sjómílar. Ekki eru tiltæk gögn til að gera upp á milli þessara tveggja möguleika, en seinni möguleikinn rímar hins vegar við áætlaðan rekhraða út frá mælingum Eyjólfss Friðgeirssonar (1979), um 2 sjómílar á dag.

Samkvæmt maisýnum virðist hafa dregið mjög úr klaki á suðvesturmiðum, strax í fyrri hluta maí, en á norðvesturmiðum virðist klak hafa verið í hámarki á sama tíma. Á 12. mynd má sjá áætlaða (bakreiknaða) rekfjarlægð frá ágústflecknum á mismunandi tímum. Hún sýnir t.d. að miðað við meðalrekhraða 3 sjómílar á dag, geta lirfur sem klöktust út um miðjan maí ekki hafa klakist út sunnar en við Snæfellsnes. Miðað við þessar forsendur er allt klak frá júní

og síðar komið frá norðvesturmiðum.

Með þeim fyrirvörum sem að framan eru taldir má því segja að marsklak frá suðvesturmiðum virðist hafa misfarist og einnig apríllak af norðvesturmiðum. Klakhópar, sem virðast hafa lifað af fram í ágúst eru því maíklak frá suðvesturmiðum og klak frá maí og síðar frá norðvesturmiðum. Jafnvel þótt klakdagadreifing í ágúst sé umreiknuð með tilliti til affalla (13. mynd, hvítar súlur í miðju), virðist samt sem a.m.k. 40 % loðnulirfanna, geti aðeins hafa klakist út á norðvesturmiðum (svæði 3). Á móti kemur að lífslíkur smárra loðnulirfa að hausti eru sennilega minni en þeirra stærri, en það hefur þó ekki verið rannsakað. Hrygning loðnu fyrir norðan land gæti því skipt máli a.m.k. sum ár, en þar sem sýnataka fór einungis fram á einu ári er ekki vitað hvort ofangreindar aðstæður teljast regla eða undantekning.

Lirfurnar, sem fengust í Tucker 4 háfinn í ágúst voru að jafnaði mun minni en þær sem veiddust í seiðavörpuna (8. mynd). Samkvæmt Pepin o.fl. (2003) veiðir Tucker4 háfur vel lirfur upp að 20 mm. Myndin sýnir vel þann mikla

mun, sem er á kjörhæfni þessara tveggja veiðarfæra og þá einnig að stór hluti lengdardreifingarinnar næst ekki í seiðavörpu. Rauðu súlurnar á 8. mynd fara væntanlega nálægt því að sýna rétta mynd af lengdardreifingu loðnulirfa í Vestfjarðafleknum, því afli í seiðavörpu (7 stöðvar) á sama svæði var enginn. Hins vegar sýna bláu súlurnar á 8. mynd ekki alla lengdardreifingu loðnulirfa í Íslandshafsleknum, því loðnulirfur, sem veiddust á Tucker4 stöðvum á suðurjaðri flekksins voru mun minni (15-38 mm) en þær sem fengust í seiðavörpunum (33-68 mm).

Á þeim stöðvum, þar sem tekin voru sýni með báðum veiðarfærum, fengust lirfur í bæði veiðarfærin á aðeins einni stöð. Þar veiddi seiðavarpan 5,8 sinnum fleiri loðnulirfur á 1000 m³, heldur en Tucker 4 háfurinn. Tvær skýringar eru nærtækar á meiri veiðni vörpunnar. Annars vegar er væntanlega meira um stórar lirfur en smáar svo norðarlega (67° 40'N). Hins vegar er varpan einungis dregin á því dýpi þar sem lóðningar sáust á dýptarmæli, en Tucker 4 er ávallt dreginn á staðlaðan hátt, frá yfirborði niður á 50 m og aftur upp í yfirborð.

Lirfur úr Tucker 4 háfi hafa ekki verið aldurslesnar, en þar sem aldurs-lengdarsamband lirfanna er gott (9. mynd), er hægt að segja með nokkurri vissu að flestar loðnulirfurnar sem veiddust í Tucker4 háfinn voru á bilinu 20-60 daga gamlar, þ.e. klakdagar voru frá byrjun júní fram í miðjan júlí og mundu því hækka hlutfall ungra lirfa á klakdagaritunum (7. og 13. mynd). Hvað vel þessar minnstu lirfur spjara sig yfir fyrsta veturinn, miðað við þær stærri úr seiðavörpunni, er ekki vitað en á því veltur hve alvarleg þessi skekkja er í gögnum úr seiðaleiðöngurum fyrri ára. Ef seiðaleiðangrar verða einhverntíma teknir upp að nýju, er rétt að hafa þetta í huga og taka sýni af smærri fisklirfum með einhverjum meðfærilegum lirfuháfi, auk toga með seiðavörpu.

Áætluð afföll

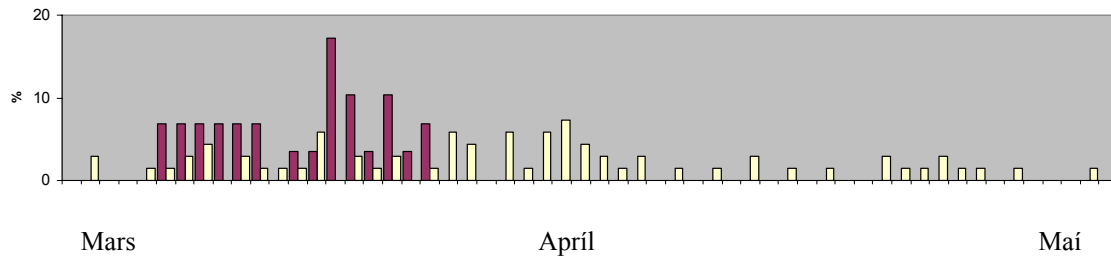
Algengast er að afföll hjá fiskum séu afar há á eggjastigi og fyrstu vikurnar eftir klak, en fari hratt lækkanði eftir það. Meðaltal yfir langan tíma er því gróf nálgun að affallaferlinum, en í tilfelli loðnu eru örfáir slíkir útreikningar það eina sem gert hefur verið til að meta afföllin fyrsta árið. Pedersen og félagar (2009) meta afföll loðnulirfa fyrstu 75 dagana eftir hrygningu sem 3,5% á dag að meðaltali. Eftir

það, þ.e. á bilinu 75-470 daga eftir hrygningu reiknast þeim til að afföllin séu um 0,5% á dag að meðaltali. Athuganir okkar ná yfir um 150 daga tímabil, frá hrygningu í mars og fram undir miðjan ágúst. Þetta er um helmingi lengri tími en lá til grundvallar meðaltalinu 3,5% á dag (Pedersen o.fl. 2009), en þar sem betri nálgun er ekki fáanleg, er stuðst við þessa tölu í útreikningum á vægi misgamalla ágústlirfa hér að ofan (13. mynd).

Vísbendingar eru um að flekkur af nýklöktum loðnulirfum, sem mældur var við Ingólfshöfða í apríl (2. mynd), sé hinn sami og mældur var aftur nálægt Höfn í maí (4. mynd). Í fyrsta lagi er flekkurinn á svipuðum slóðum og í fyrri mælingunni og í öðru lagi samsvarar meðallengd lirfanna (19,4 mm) í maífleknum við Höfn, eðlilegum vexti milli mánaða (0,33 mmd⁻¹), meðan meðallengdin í litla flekknum við Ingólfshöfða er aðeins 10,9 mm (samsvarar meðalvexti upp á einungis 0,11 mmd⁻¹). Í þriðja lagi eru þeim mun færri loðnulirfur í flekknum í maí en í apríl, að gæti rímað við náttúruleg afföll. Í fjórða lagi eru klakdagar loðnulirfanna í báðum tilfellum sambærilegir fyrir elstu lirfurnar í flekkjunum. Í aprílfleknum eru klakdagar loðnulirfanna á bilinu 88-105 (talið frá áramótum, þ.e. þær hafa klakist í apríl). Í maífleknum eru elstu lirfurnar einnig með klakdaga á þessu bili, sem bendir ákveðið til að þetta sé sami flekkurinn (sbr. 14. mynd). Að það skuli einnig vera lirfur í maífleknum með klakdaganúmer hærra en 105 sýnir að nýjar loðnulirfur hafa bæst í flekkinn eftir að sýni voru tekin í apríl. Að því gefnu að þetta sé sami flekkurinn, má nota endurtekna mælingu á honum til að áætla gróflega afföll loðnulirfanna á tímabilinu milli mælinga.

Aðferðin byggist á aldursgreindum lirfum og meðalafla á 1000 m³, innan flekksins. Það er því mikilvægt að aldursgreining sé rétt, en samkvæmt Ivarjord og félagum (2008) myndast ekki dægurhringir alla daga ef loðnulirfurnar vaxa hægt, eða < 0,3 mmd⁻¹. Í okkar tilfelli var vöxtur þess klakhóps, sem kom fram í báðum mælingum 0,39 mmd⁻¹ og þar ættu því að myndast dægurhringir í a.m.k. 96% tilfella (Ivarjord og fleiri., 2008). Ekki er gert ráð fyrir innflutningi eða útflutningi á lirfum úr flekknum á tímabilinu, heldur eingöngu náttúrulegum af-föllum hjá viðmiðunarhópnum.

Afföllin eru einungis metin út frá fækkun í þeim klakhópi sem til staðar var í báðum mælingum (14. mynd). Myndin sýnir dreifingu



14. mynd. Klakdagadreifing loðnulirfa úr flekknum við Suðausturland. Rauðar súlur sýna klakdaga loðnulirfa úr aprilsýnum, en gular súlur sýna klakdaga lirfa úr maísýnum. Eins og sjá má hefur talsvert klakist út eftir að aprilleiðangrinum lauk, en þær lirfur eru ekki notaðar í útreikningum á afföllum. Athugið að log skali er á y-ás.

Figure 14. The hatch date distribution of capelin larvae in the patch at southwest Iceland. Red columns show the hatch dates of larvae from April and yellow columns show hatch dates of larvae from May. Two additional cohorts appear to have been added to the patch after the first sampling in April, but these larvae are not used in the mortality calculations. Note log scale on y-axis.

aldursgreindra lirfa úr flekknum frá apríl og maí. Í útreikningum er aldursgreindur fjöldi umreiknaður miðað við 1000 m³. Unnt er að greina a.m.k. þrjá klakhópa. Afföllin voru þó einungis reiknuð út frá þeim fyrsta, en hann kemur fram í báðum mælingunum. Útreiknuð meðalafföll yfir 38 daga eftir klak voru samkvæmt þessu 7 % á dag, sem er talsvert hærra en reiknuð afföll loðnulirfa í Barentshafi, þ.e. 3.5 % á dag að meðaltali fyrstu 75 dagana eftir hrygningu (Pedersen o.fl. 2009). Hins vegar er vitað að afföll minnka mjög hratt fyrstu vikur og mánuði eftir klak og því þurfa niðurstöður okkar ekki að vera í ósamræmi við afföll loðnu í Barentshafi.

Þakkir

Hjálmar Vilhjálmsson og Ólafur K. Pálsson veittu margar góðar ábendingar varðandi texta og efnistöð.

Heimildir

- Anon. 2008. *Þættir úr vistfræði sjávar 2007. Environmental conditions in Icelandic waters 2007*. Reykjavík 2008. 40 bls.
- Anon. 2010. *Nytjastofnar sjávar 2009/2010. Aflahorfur fiskveiðiárið 210/2011. State of marine stocks in Icelandic waters 2009/2010. Prospects for the Quota Year 2010/2011*. Reykjavík 2010. 178 bls.
- Batty, R. S. 1984. Development of swimming movements and musculatur of larval herring (*Clupea harengus*). *Journal of experimental Biology* 110: 217-229.
- Campana, S. E. & Moksness, E. 1991. Accuracy and precision of age and hatch date estimates from otolith microstructure examination. *ICES Journal of Marine Science* 48: 303-316.
- Eyjólfur Friðgeirsson 1976. Observations on spawning behaviour and embryonic develop-

ment of the Icelandic capelin. *Rit Fiskideildar* 5(4) 35 bls.

- Eyjólfur Friðgeirsson 1979. Notes on capelin and sandeel larvae collected in Icelandic waters 1976-1979. *ICES C.M. 1979/L:28*. 17 bls.
- Fortier, L. & Leggett, W. C. 1985. A drift study of larval fish survival. *Marine Ecology Progress Series* 25: 245-257.
- Frank, K. T. & Carscadden, J. E. 1989. Factors affecting recruitment variability of capelin (*Mallotus villosus*) in the Northwest Atlantic. *Journal de Conseil International pour l'Exploration de la Mer* 45: 146-164.
- Frank, K. T. & Leggett, W. C. 1981. Prediction of egg development and mortality rates in capelin (*Mallotus villosus*) from meteorological, hydrographic, and biological factors. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 38: 1327-1338.
- Frank, K. T. & Leggett W. C. 1982. Coastal water mass replacement: Its effect on zooplankton dynamics and the predator-prey complex associated with larval capelin (*Mallotus villosus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 39: 991-1003.
- Frank, K. T. & Leggett W. C. 1986. Effect of prey abundance and size on growth and survival of larval fish: an experimental study employing large volume enclosures. *Marine Ecology Progress Series* 34: 11-22.
- Gjøsæter, H. 1998. The population biology and exploitation of capelin (*Mallotus villosus*) in the Barents Sea. *Sarsia* 83: 453-496.
- Gjøsæter, J. & Monstad, T. 1985. Primary growth rings in otoliths of the Barents Sea capelin, *Fiskeridirektoratets Skrifter, Serie Havundersøgelser* 17: 521-528.
- Hjálmar Vilhjálmsson 1994. The Icelandic capelin stock. Capelin (*Mallotus villosus* Müller) in the Iceland- Greenland-Jan Mayen area. *Rit*

- Fiskideildar* 13:1-281.
- Ivarjord, T., Pedersen, T. & Moksness, E. 2008. Effects of growth rates on the otolith increments deposition rate in capelin larvae (*Mallotus villosus*). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 358: 170 – 177.
- Jakobsen, R. A., Pedersen, T. & Moksness, E. 2004. Growth rates and age distributions of capelin (*Mallotus villosus*) larvae in the Barents Sea investigated by otolith increment analysis. *ICES CM 2004/DD:08*.
- Jespersen, P. 1920. On the occurrence of the post-larval stages of the herring and the “lodde” (*Clupea harengus* L., and *Mallotus villosus* O.F.M.) at Iceland and the Færoes. *Meddelelser fra Kommissionen for havundersøgelser. Serie: Fiskeri*, 6(1): 1-25.
- Jutta Magnússon 1966. On capelin larvae (*Mallotus villosus* O.F.Müller) in Icelandic waters during the years 1960 to 1964. With some notes on other fish larvae. *Rit Fiskideildar* 4: 36 bls.
- Kjartan Thors 1981. Environmental features of the capelin spawning grounds south of Iceland. *Rit Fiskideildar* 6(1): 7-13.
- Moksness, E. 1982. Food uptake, growth and survival of capelin larvae (*Mallotus villosus* Müller) in an outdoor constructed basin. *Fiskeridirektoratets Skrifter, Serie Havundersøgelser*. 17: 267-285.
- Olafsdóttir, A.H. & Anderson, J.T. 2010. Growth and survival of Icelandic capelin *Mallotus villosus* larvae. *Marine Ecology Progress Series* 403: 231 – 241.
- Pedersen, O. P., Pedersen, T., Tande K. S. & Slagstad, D. 2009. Integrating spatial and temporal mortality from herring on capelin larvae: a study in the Barents Sea. *ICES Journal of Marine Science* 66: 2183-2194.
- Pepin, P., Dower, J. F. and Davidson, F. J. M. 2003. A spatially explicit study of prey-predator interactions in larval fish: assessing the influence of food and predator abundance on larval growth and survival. *Fisheries Oceanography* 12(1): 19-33.
- Schmidt, J. 1906. On the larval and post-larval development of the argentine (*Argentina silus* [Ascan.] and *Argentina sphyraena* Linne). With some notes on *Mallotus villosus* [O.F.Müller]. *Meddelelser fra Kommissionen for havundersøgelser. Serie Fiskeri*. 2(4): 1-23.
- Unnsteinn Stefánsson 1999. *Hafið*. Háskólaútgáfan. 480 bls.
- Auk þess árlegar skýrslur Hafrannsóknastofnunarinnar um seiðaleiðangra 1970-2003. Ýmsir höfundar.

Lífshættir loðnu í Íslandshafi

Ólafur K. Pálsson, Sveinn Sveinbjörnsson, Héðinn Valdimarsson,
Ástþór Gíslason og Hjálmar Vilhjálmsson

Hafrannsóknastofnunin

Ágrip

Ólafur K. Pálsson, Sveinn Sveinbjörnsson, Héðinn Valdimarsson, Ástþór Gíslason og Hjálmar Vilhjálmsson 2012. *Lífshættir loðnu í Íslandshafi. Hafrannsóknir nr. 164*. Loðnurannsóknir innan ramma verkefnisins Vistkerfi Íslandshafs fóru fram í þremur umfangsmiklum leiðöngrum í júlí 2006 og ágúst 2007 og 2008. Í þessari grein er lýst helstu niðurstöðum þessara rannsókna en einnig eru gögn frá fyrri rannsóknum á þessu hafsvæði höfð til samanburðar í nokkrum tilvikum. Greining á nokkrum lífsöngulegum þáttum loðnu, svo sem vexti (lengd og þyngd), fæðu og fituforða, sýnir að þessir þættir hafa í meginatriðum verið svipaðir síðustu þrjá áratugina. Útbreiðsla loðnu á öllum aldri hefur hinsvegar breyst í grundvallaratriðum. Útbreiðsla loðnuseiða á fyrsta ári var mun norðlægari og vestlægari 2006-2008 en áður. Útbreiðsla eldri loðnu (aldursflokkar I-III) var á hinn bóginn mun suðlægari og vestlægari. Mjög lítið fannst þó af þessum aldursflokkum öll árin. Umhverfishiti loðnu á fjórum svæðum/stöðvum, þar sem magn loðnu var verulegt, var á bilinu -1,5 til 4°C. Vaxandi meðallengd loðnuseiða í ágúst 2008, með tilliti til staðsetningar þeirra, bendir til þess að seiðin reki með straumum inn í sunnanvert Íslandshaf, þaðan yfir til Austur Grænlands og berist þannig á nýjar uppeldisstöðvar. Norðlæg útbreiðsla seiða, utan við íslenska landgrunnið, varð fyrst áberandi í ágúst 2003, sama árið og nýliðunarbrestur varð í loðnustofninum, en loðnuárgangar voru slakir frá þeim tíma til árisins 2009. Sú tilgáta er nærtæk að hér sé ekki um tilviljun að ræða, heldur sé norðlæg útbreiðsla seiða og rek þeirra til Austur Grænlands, á nýjar (sennilega lakari) uppeldisstöðvar, afleiðing breytinga á umhverfisþáttum eða atferli loðnu sem leitt hafi til lélegrar nýliðunar.

Abstract

Ólafur K. Pálsson, Sveinn Sveinbjörnsson, Héðinn Valdimarsson, Ástþór Gíslason and Hjálmar Vilhjálmsson 2012. *Capelin life-history traits in the Iceland Sea. Marine Research in Iceland no. 164*. Capelin (*Mallotus villosus*) life-history was investigated in three extensive surveys in July 2006 and August 2007 and 2008 in the Iceland Sea Ecosystem Project 2006-2008. This paper presents some of the main results of these surveys, incorporating also some data from previous research efforts in the area for comparison. Analyses of life history traits, i.e.,

growth (length, weight), feeding and fat content, indicate that these traits have generally been without a trend during the last three decades. The distribution of capelin, on the other hand, has changed substantially in recent years. The distribution of 0-group capelin was more westerly and northerly in 2006-2008 than observed before, while the distribution of older capelin (ages 1-3) was more southerly and westerly than previously observed. Further, all age groups were less abundant than in previous years. The ambient temperature of capelin on 4 selected stations was in the range -1.5 to 4°C. The spatial pattern of 0-group capelin mean length in August 2008 indicated a drift into the southern part of the Iceland Sea and from there into East Greenland continental shelf waters, to new, eventually less favourable, nursery areas. Extreme, northerly distribution pattern of 0-group capelin, outside the Icelandic continental shelf, was first observed in August 2003 and seems to have prevailed since. This coincides with the onset of a greatly reduced recruitment to the capelin stock. The hypothesis is tempting that these events may be traced to the same cause, which is likely to originate in the larval phase of the capelin.

Inngangur

Loðna (*Mallotus villosus*) er smávaxinn kaldsjávarfiskur og skyld laxfiskum. Hún finnst aðeins á norðurhveli jarðar og er talin eiga uppruna sinn í norðanverðu Kyrrahafi. Talið er að þaðan hafi hún komist í Atlantshaf, norðan Kanadíska heimskautasvæðanna fremur en norðan Síberíu, tvisvar á jarðsöngulegum hlýviðrisskeiðum fyrir um það bil 2 og 1,6 milljón árum síðan (Dodson o.fl. 2007). Nú á tímum finnst loðna mjög víða í norðanverðu Atlantshafi, enda flokkast hún undir svokallaða tækifærissinna, þ.e. hún finnur sér fljótt búsvæði þar sem henni er mögulegt að hafast við. Af sömu ástæðum bregst loðnan einnig fljótt við utanaðaðkomandi áreiti eins og t.d. umhverfisbreytingum. Enda þótt loðnan sé kaldsjávarfiskur þarf hún um 2°C hita að lágmarki (kjörhiti ca. 2°–10°C) til þess að hrygning og klak heppnist, svo og sand/malar botnlag sem er hæfilega fingert til þess að hrognin geti límt við botninn og haldist þar þangað til lirlan

klekst út. Fyrir utan hrygningar- og klaktímann og næstu 5–6 mánuðina eftir það heldur loðnan sig í köldum sjó og þolir allt að -1.5°C , amk. tímabundið.

Víðast þar sem loðna hrygnir er sjávarhiti lægri en 2°C (Nýfundnaland, Labrador, Grænland og norðanvert Kyrrahaf). Þetta leysir loðnan með því að bíða þar til sólin hefur hitað yfirborð sjávar nægilega og hrygnir þá uppi í fjöru eða á mjög grunnu vatni. Þótt undarlegt sé, m.a. vegna rasks í fjörum vegna úthafsöldu og af ýmsum öðrum ástæðum, er þetta hin almenna regla og raunar er aðeins vitað um þrjá loðnustofna sem hrygna á dýpra vatni þar sem ölduróts gætir lítið sem ekkert. Þetta eru Barentshafsloðnan og Íslandsloðnan (þ.e. loðnan á svæðinu kringum Ísland og í Íslandshafi) og tiltölulega litill stofn sem hrygnir á Miklabanka, á litlu svæði um 200 sjómílnur SA af Nýfundnalandi. Allir þessir stofnar hrygna í hlýjum atlantískum sjó, þar sem sjávarhiti er ca. $5-7^{\circ}\text{C}$ við Ísland en nokkru lægri, eða $2-5^{\circ}\text{C}$ í Barentshafi og á Miklabanka. Að því að best er vitað eru loðnustofnarnir í Barentshafi og við Ísland langstærstir á heimsvísu þegar vel árar.

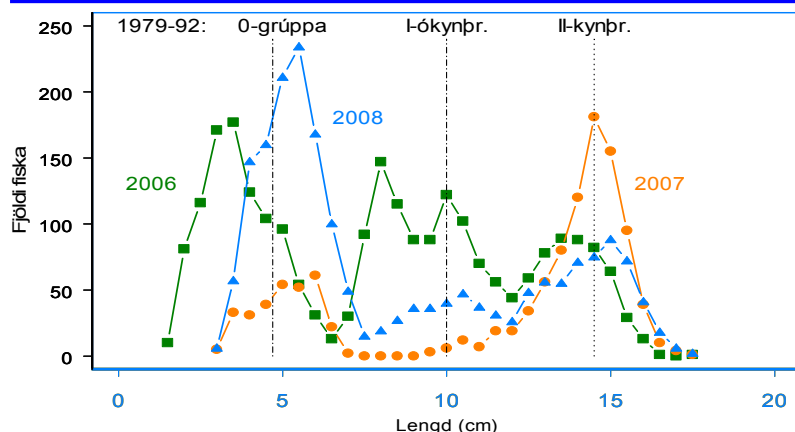
Enda þótt skipulegar, samfelldar loðnurannsóknir hæfust ekki hér við land fyrir en á 7. áratug seinustu aldar, var mönnum engu að síður kunnugt um aðaldrættina í lífssögu loðnunnar, t.d. hrygningarsvæðin sunnan- og vestanlands, gríðarstóran hrygningarsstofn, mikinn seiðafjölda, nær algeran dauða að hrygningu lokinni, seiðarek, a.m.k hluta uppvaxtarsvæða hinna mismunandi aldurs- og stærðarflokka og mikilvægi þessa smávaxna fisks í fæðukeðjunni í hafinu kringum Ísland. Þetta var að mestu leyti árangur verka Danans Paul Jespersens (1920), sem einkum rannsakaði hrygningu og ungstig og Bjarna Sæmundssonar (1926), sem fylgdi rannsóknum Jespersens eftir varðandi eldri hluta stofnsins bæði með eigin athugunum og samtölum við sjómenn. Hvorki Bjarna né Paul Jespersen tókst að aldursgreina loðnuna, en þá gátu leysti Árni Friðriksson (1943) nokkrum árum síðar.

Íslenska loðnan hrygnir að langmestu leyti í Atlantssjónum ($5-7^{\circ}\text{C}$) við suður og vesturströndina aðallega á sandbotn á 30-50 m dýpi (Kjartan Thors 1981) þar sem hrognin límast við botninn (sandkornin). Loðnan hrygnir þó af og til nokkru grynnra og talsvert dýpra en þetta (5-150 m; Hjálmar Vilhjálmsson 1994). Sunnanlands er venjulegur hrygningartími frá

því seint í febrúar og fram í mars/apríl, en einum til tveimur mánuðum seinna og í miklu minna mæli í flóum og fjörðum norðanlands og austan. Sunnan- og vestanlands klekjast lirfurnar út á um það bil þremur vikum, fljóta þá upp undir yfirborð og berast síðan með hafstraumum réttisælis á uppeldisstöðvarnar norðanlands og austan, út í Grænlandssund og jafnvel enn lengra vestur (t.d. Jutta Magnússon 1966, Eyjólfur Friðgeirsson 1974, Hjálmar Vilhjálmsson & Eyjólfur Friðgeirsson 1975).

Markverðar breytingar á umhverfisaðstæðum og lífsháttum fiskstofna eru ekki nýmæli á Íslandsmiðum og nálægum hafsvæðum. Á þriðja áratug síðustu aldar varð mikil hlýnun loftslags og sjávar hér um slóðir og sömuleiðis við Grænland og birtust vísindagreinar um þetta fyrirbæri, sbr. Bjarni Sæmundsson (1934), Jensen (1939) og Árni Friðriksson (1943). Það er athyglisvert að í skrifum sínum nefna bæði Bjarni Sæmundsson (1934) og Jensen (1939) mismikla loðnugengd og/eða tilfærslu útbreiðslusvæða loðnunnar norður á bóginn bæði við Ísland og Grænland. Þetta tengdu þeir báðir við hina miklu hlýnun sjávar á 3. og 4. áratug seinustu aldar. Jensen (1939) staðhæfir að eftir 1925-30 hafi þungamiðja útbreiðslu loðnu við Vestur-Grænland færst um 300-400 sjómílnur norður frá Nuuk og í Diskó flóa. Að sínu leyti staðhæfir Bjarni Sæmundsson (1934) að eftir 1928 hafi verið nauðalítið um loðnu á venjulegum hrygningarslóðum hér við Suður- og Suðvesturland, en loðnan þess í stað hrygnt í stórum stíl á Hornafjarðarsvæðinu og þess utan bæði norðan- og austanlands. Einnig taldi Bjarni að minna hafi þá verið af loðnu á Íslandsmiðum en áður. Þetta ástand virðist þó ekki hafa varað lengi hér við land því 1935 var aftur farið að háfa loðnu til beitu í Faxaflóa, enda hafði sjávarhiti þá lækkað nokkuð frá hámarkinu um og uppúr 1930. Segja má að ofangreind lýsing Bjarna eigi mæta vel við ástand íslenska loðnustofnsins eins og það hefur verið nokkur undanfarin ár að því frátöldu að loðnan hrygnir enn sunnan- og suðvestanlands.

Hiti og selta fór hækkandi í Atlantssjónum sunnan og vestan við landið um og upp úr 1996. Álíka breytinga varð vart á næstu árum norðan og austan við land. Hin auknu hlýindi sem þessu fylgdu hafa, með nokkrum frávikum, haldist síðan og nema nú (2010) um 1°C sunnanlands en um $1-2^{\circ}\text{C}$ fyrir norðan land. Þá hefur seltan vaxið úr 35.01 í 35.13 fyrir sunnan og úr um



1.mynd. Lengdardreifingar loðnu í Íslandshafi í júlí 2006 og ágúst 2007-2008. Lóðréttar línur sýna meðaðllengd aldursflokka skv. fyrri rannsóknum 1979-1992.

Figure 1. Length distributions of capelin in the Iceland Sea in July 2006 and August 2007-2008. Horizontal lines indicate mean length of age groups based on data collected during 1979-1992.

34.6 í 34.8 fyrir norðan. Ennfremur hækkaði hiti og selta í Austur-Íslandsstraumnum, einkum sunnantil. Árið 2005 var hiti yfir meðallagi í sunnanverðu Íslandshafi (Mork 2006) og sjór er nú bæði hlýrri og saltari í vestanverðu Noregshafi en verið hefur um langt skeið (Anon. 2005b). Hlýrri og selturíkari sjór, eins og verið hefur í Grænlandssundi að undanförmu, getur haft þau áhrif að hlýrra verði á Grænlandsflákanum þar vestur af. Þetta eru gríðarmiklar breytingar á hafsvæði eins og okkar og líklegar til að hafa umtalsverð áhrif á lifríkið umhverfis landið, t.d. í formi breytinga á tegundasamsetningu (þ.m.t. suðlægari tegundir) og útbreiðslu svo og aukningu bæði plöntu- og dýrasífs. Þá má gera ráð fyrir einhverjum breyt-

ingum á hafstraumum, en það getur vitanlega haft áhrif á tíma- og staðsetningu hrygningar margra nytjastofna, svo og rek lirfa og seiða.

Í þessari grein er lýst niðurstöðum rannsókna á loðnu í Íslandshafi og á nálægum hafsvæðum 2006 til 2008, en gögnum og aðferðum er lýst í meginatriðum í fyrstu grein þessa rits. Gögn og niðurstöður um loðnu frá fyrri rannsóknum voru einnig höfð til samanburðar við nýrri niðurstöður.

Niðurstöður

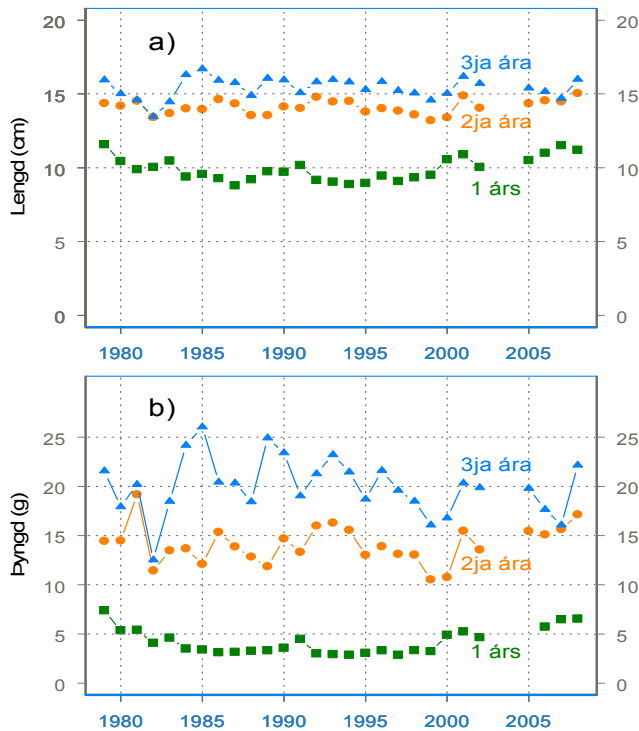
Lengd og þyngd eftir aldri

Lengdardreifing loðnu að sumarlagi sýnir greinilega skiptingu í aldursflokka, þ.e. seiði á fyrsta ári (0-grúppa) um 5 cm að lengd, eins árs

1. tafla. t-próf á meðallengd (cm), meðalþyngd (g) og holdastuðlum loðnu í Íslandshafi í ágúst 1979-2008. * = marktækur munur ($p < 0.05$), ** = marktækur munur ($p < 0.01$).

Table 1. t-test for mean length (cm), weight (g) and condition factor in the Iceland Sea in August 1979-2008. * = significant difference ($p < 0.05$), ** = significant difference ($p < 0.01$).

Atriði	1 árs	2ja ára	3ja ára
Lengd:			
Meðalgildi 1979-1999	9,61	14,04	15,51
Meðalgildi 2000-2008	10,86	14,39	15,45
p-gildi	<0,001 **	0,11	0,832
Þyngd:			
Meðalgildi 1979-1999	3,76	13,90	20,38
Meðalgildi 2000-2008	5,57	14,72	18,95
p-gildi	0,001 **	0,345	0,272
Holdastuðull:			
Meðalgildi 1979-1999	1,021	1,010	1,050
Meðalgildi 2000-2008	1,001	0,993	0,995
p-gildi	0,508	0,442	0,022 *



2. mynd. Meðallengd (a) og meðalþyngd (b) eins til þriggja ára loðnu í Íslandshafi í ágúst 1979-2008 (júlí 2006).

Figure 2. Mean length (a) and mean weight (b) of capelin, age groups I-III, in the Iceland Sea in August 1979-2008 (July 2006).

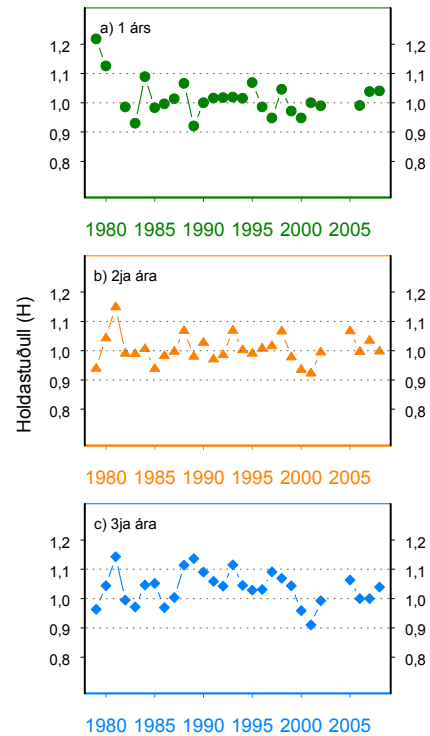
loðnu um 10 cm og tveggja og þriggja ára loðnu 14 til 15 cm að lengd (1. mynd). Loðnan var greinilega smærri í júlí 2006 en í ágúst 2007 og 2008 og gefur það til kynna verulegan vöxt (1-2 cm) á þeim mánuði sem þarna munar í tíma.

Meðallengd og meðalþyngd loðnu eftir aldri í ágúst hafa sveiflast nokkuð yfir tímabilið 1979 til 2008 (2. mynd). Hjá eins árs loðnu voru meðallengd og meðalþyngd í hærra lagi 1979-1980, fremur lágar 1982-1999 en jukust þá nokkuð og voru marktækt hærri að jafnaði frá aldamótum (2000-2008) en hin árin skv. t-prófi (1. tafla). Meðalgildi þessara lífsögulegu þátta voru svipuð hjá tveggja og þriggja ára loðnu þessi tvö tímabil og því ekki marktækur munur þar á.

Holdastuðull (H) skv. Le Cren (1951) lýsir meðalþyngd á tilteknum tíma (W) miðað við reiknaða meðalþyngd yfir lengra tímabil ($W_{\text{reiknað}}$),

$$H = W / W_{\text{reiknað}}$$

Reiknuð meðalþyngd er ákvörðuð skv. $W_{\text{reiknað}} = \exp(a + b \log L)$ þar sem L er lengd loðnu og a og b eru fastar sem ákvarðaðir eru með línulegri aðhvarfsgreiningu, byggðri á gögnum tímabilsins 1979-2008 (mælingar á 64



3. mynd. Holdastuðlar eins árs (a), tveggja ára (b) og þriggja ára (c) loðnu í Íslandshafi í ágúst 1979-2008 (júlí 2006).

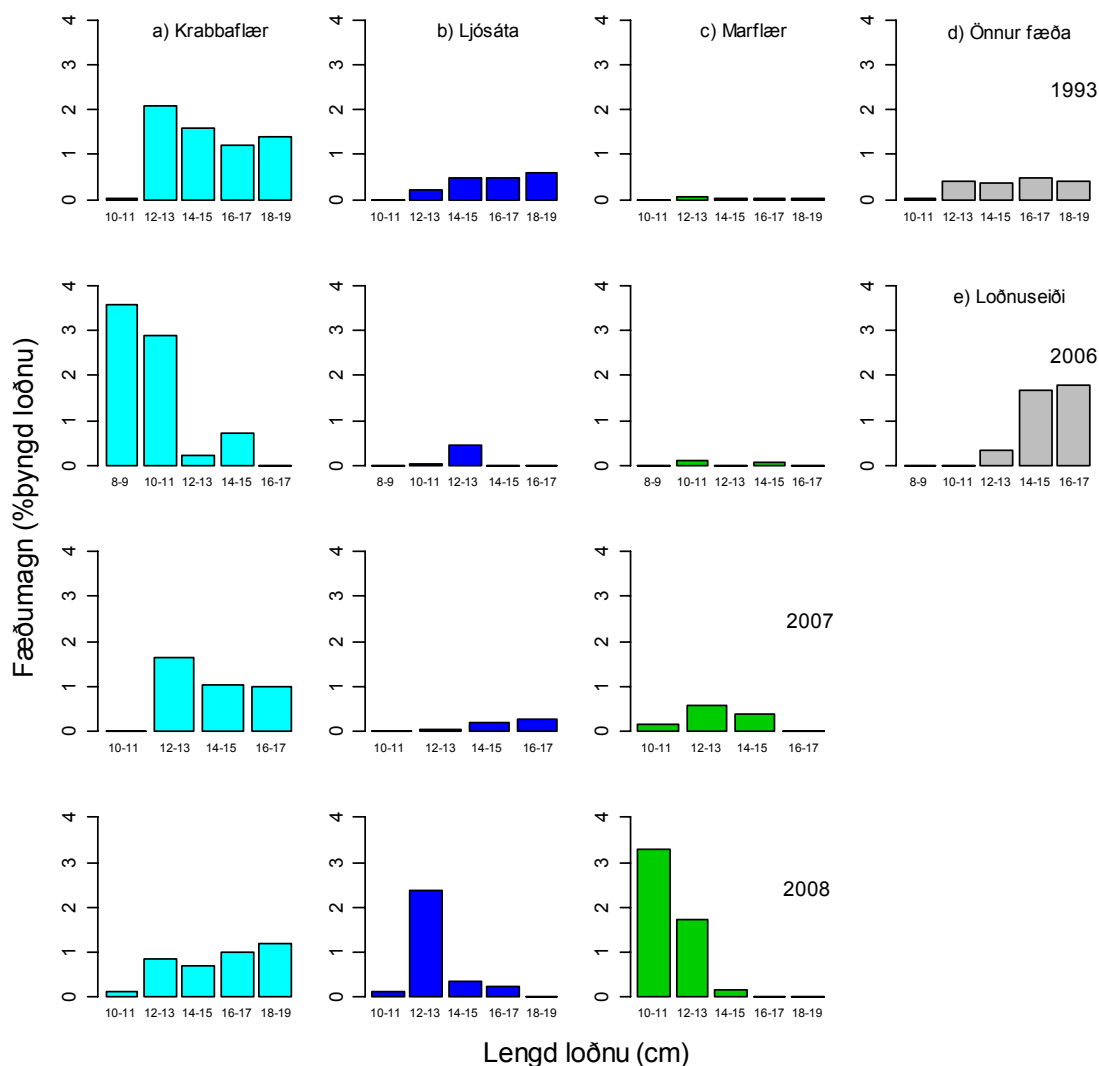
Figure 3. Condition indices of age 1 (a), age 2 (b) and age 3 (c) capelin in the Iceland Sea in August 1979-2008 (July 2006).

þúsund loðnum). W er mæld þyngd í ágúst ár hvert.

Holdastuðlar aldursflokkanna þriggja sveifluðust nokkuð yfir tímabilið 1979 til 2008 (3. mynd). Samanburður á meðalgildum tímabilsins 1979-1999 annarsvegar og tímabilsins 2000-2008 hinsvegar, sýnir að hjá eins árs og tveggja ára loðnu var ekki marktækur munur á holdastuðlum. Á hinn bóginn var holdastuðull 3ja ára loðnu marktækt lægri síðara tímabilið ($p < 0.05$, 1. tafla). Mælingar voru þó takmarkaðar (<50 fiskar á ári) af þessum aldursflokki á þessu tímabili.

Fæða

Sýnum til rannsókna á fæðu loðnu var safnað úr nokkrum togum þar sem eins til þriggja ára loðna fékkst í leiðöngrum að sumarlagi 2006 til 2008. Fæða loðnuseiða (0-grúppu) var ekki hluti af þeirri gagnasöfnun. Alls var fæðusamsetning greind í 165 loðnum í júlí 2006, í 180 loðnum í ágúst 2007 og í 80 loðnum í ágúst 2008. Heildarmagn fæðu í hverjum maga var vegið með sjóvog með 0.1 gramms nákvæmni og hlutfall helstu fæðuflokka áætlað. Magn hvers fæðuflokks var síðan umreiknað yfir í grömm og loks reiknað



4. mynd. Fæðumagn í maga (% af þyngd loðnu) eftir fæðuhópum og lengdarflokum loðnu í Íslandshafi í júlí 1993 og 2006 og ágúst 2007-2008.

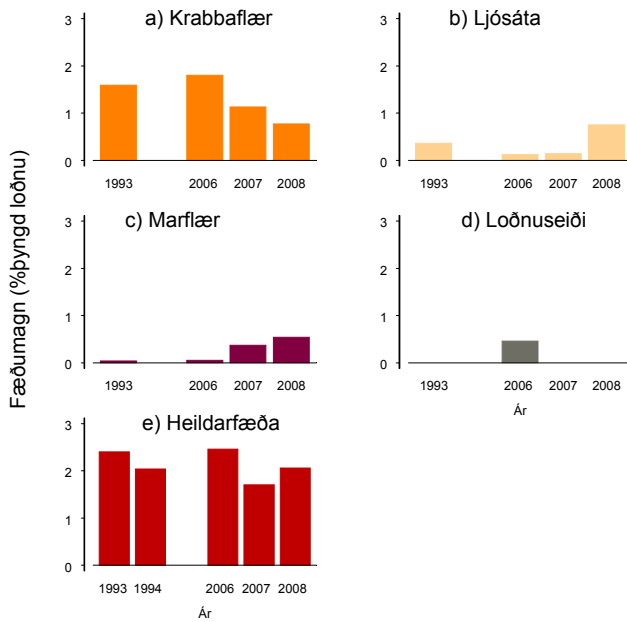
Figure 4. Stomach content weight (% of capelin weight) by prey groups and predator length groups in the Iceland Sea in July 1993 and 2006 and August 2007-2008.

sem hlutfall (%) af þyngd loðnu af viðkomandi stærð. Meðalmagn fæðuflokka, og heildarfæðu, var reiknað fyrir tveggja cm lengdarflokka loðnu.

Í júlí 2006 voru krabbaflær uppistaða fæðu hjá smærri loðnunni (<12 cm), en lítt áberandi hjá þeirri stærri (4. mynd). Loðnuseiði voru hinsvegar aðalfæðan hjá stærstu loðnunni (≥ 14 cm). Svo virðist sem útbreiðsla loðnuseiða og stærri loðnu hafi skarast meira í júlí 2006 en hin árin. Einnig eru loðnuseiði smærri í júlí en í ágúst og því e.t.v. hentugri bráð fyrir stærri loðnu. Þetta gæti hafa leitt til meira áts stærri loðnu á loðnuseiðum í júlí 2006 en í ágúst hin árin. Ljósáta og marflær komu lítið við sögu í fæðunni árið 2006. Í ágúst 2007 voru krabbaflær

áfram stór hluti fæðunnar hjá 12–17 cm loðnu. Marfló var helst étin af miðlungs loðnu, 12–15 cm, en lítið étið af ljósátu. Í ágúst 2008 voru krabbaflær tiltölulega lítill hluti fæðunnar en þó étnar af loðnu af flestum stærðum. Marflær voru hinsvegar mikilvæg fæða, einkum hjá smærri loðnu. Ljósáta var étin að marki af loðnu á mjög þröngu lengdarbili (12–13 cm) en annars í litlum mæli í stöku lengdarflokum.

Gögn frá rannsóknum á fæðu loðnu í Íslandshafi í júlí 1993 og 1994 (Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1997) voru notuð til að reikna fæðumagn til samanburðar við síðustu ár. Magafylli var tiltölulega jöfn eftir lengd í júlí 1993 og krabbaflær veigamesta fæðan í flestum lengdarflokum. Ljósáta var



5. mynd. Fæðumagn í maga loðnu (% þyngd loðnu) eftir fæðuhópum í Íslandshafi í júlí 1993 og 2006 og í ágúst 2007-2008 og heildarfæða sömu ár auk 1994.

Figure 5. Stomach content weight (% of capelin weight) by prey groups in the Iceland Sea in July 1993 and 2006 and August 2007-2008, and total food in same years and in 1994.

meira áberandi hjá stærri loðnu, en lítið étið af marflóm.

Þegar lítið er til meðalmagns fæðu án tillits til lengdar má sjá að mest var af krabbaflóm (*Calanus sp.*) í fæðunni í júlí 2006 (1,80% af þyngd loðnunnar) og 1993 (1,59%) en minna seinni tvö árin (5. mynd). Lítið var étið af ljósátu 2006 og 2007 (0,1 og 0,14%) en hlutfallið jókst í 0,75% 2008. Á marflóm fór vaxandi úr 0,05% 2006 í 0,54% 2008. Loðnu-

seiði greindust eingöngu í loðnumögum í júlí 2006 (0,46%). Breytingar á heildarátti voru minni en breytingar á einstökum fæðuhópum. Heildarátt var nánast jafn mikið 1993 (2,40%) og 2006 (2,46%), heldur minna 1994 og 2008, en minnst 2007 (1,70%). Því má álykta að heildarfæðunám hafi verið svipað þessi tvö stuttu tímabil.

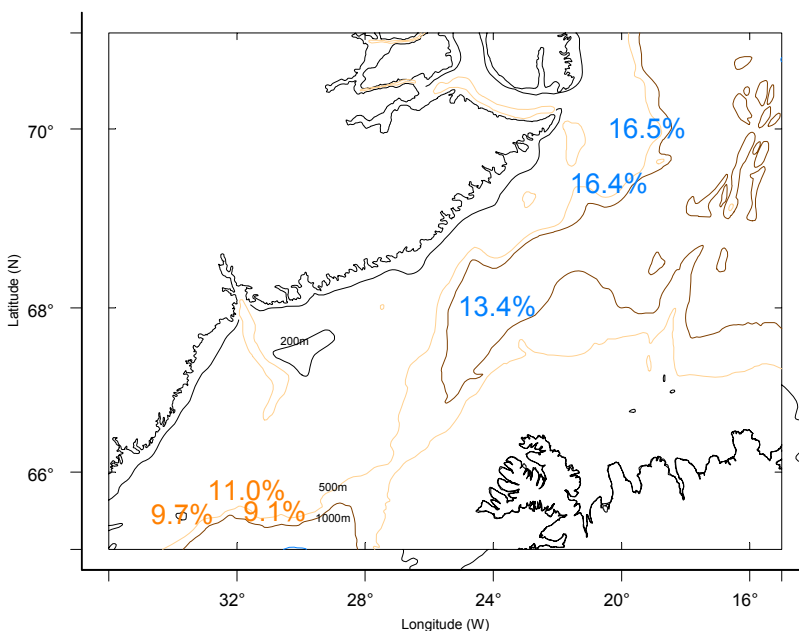
Fituhlutfall

Á nokkrum stöðvum voru tekin sýni til fitumælinga sem gerðar voru af starfsmönnum Matis (áður Rannsóknastofnun fiskiðnaðarins). Í júlí 2006 var hlutfallið 9,1 til 11,0% og er það í lægra lagi miðað við fyrri mælingar frá 1976-1977 (12,2-13,0%, Hjálmar Vilhjálmsson 1994, Table IX). Þessi sýni voru tekin sunnarlega á rannsóknasvæðinu og í reynd utan hins eiginlega Íslandshafs (6. mynd).

Í ágúst 2007 voru sýni tekin mun norðar, eða allt norður undir Scoresbysundi, og var fituhlutfall þar um 16,5%. Talsvert sunnar var hlutfallið 13,4%. Þetta er innan þeirra marka sem mælst hefur áður um svipað leyti árs (12,0 – 18,5%, meðalgildi 15,5%, Hjálmar Vilhjálmsson 1994, Table IX).

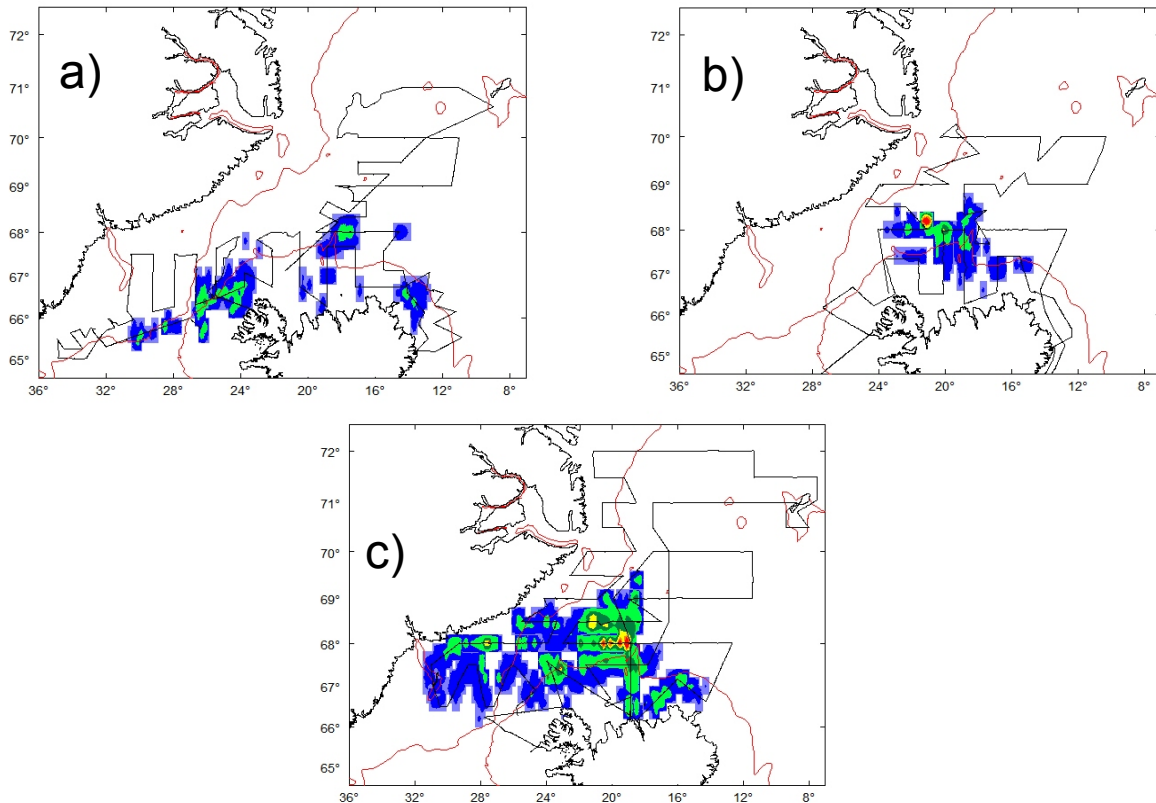
Útbreiðsla og lengd loðnuseiða

Á árunum 2001-2003 urðu miklar breytingar á útbreiðslu loðnuseiða á fyrsta ári (0-grúppa) (Sveinn Sveinbjörnsson & Einar Hjörleifsson 2001, 2002, 2003). Í ágúst 2001 var útbreiðslan norðlægari og vestlægari en venjulega og einkum takmörkuð við djúpslóð norður af Íslandi og Grænlandssundi. Í ágúst 2002 varð lítið vart loðnuseiða á íslenska landgrunninu



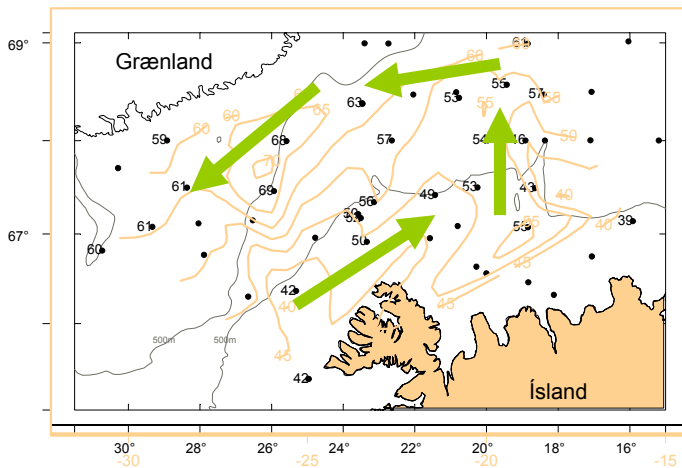
6. mynd. Fita (%) í loðnu í Íslandshafi í júlí 2006 (brúnar tölur) og ágúst 2007 (bláar tölur). Jafndýplínur (200, 500 og 1000 m) eru sýndar.

Figure 6. Fat content (%) in capelin in the Iceland Sea in July 2006 (brown numbers) and August 2007 (blue numbers). Depth contour lines (200, 500 and 1000 m) are shown.



7. mynd. Útbreiðsla (bergmálgildi) loðnuseiða (0-grúpu) í Íslandshafi í júlí 2006 (a), ágúst 2007 (b) og ágúst 2008 (c). Leiðarlínur (svartar) og 500 m dýptarlínur (rauðar) eru sýndar.

Figure 7. Distributions (echo abundance) of 0-group capelin in the Iceland Sea in July 2006 (a), August 2007 (b), and August 2008 (c). Survey track lines (black) and 500 m depth contour lines (red) are shown.

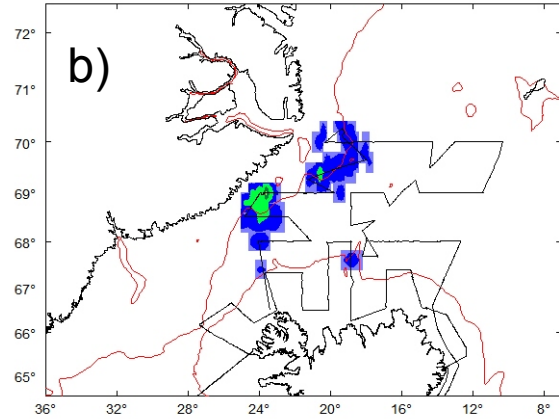
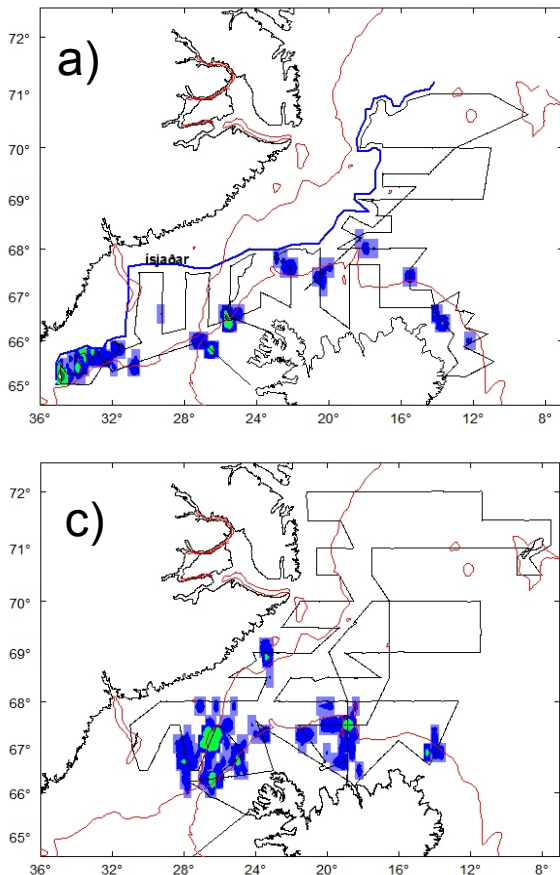


8. mynd. Útbreiðsla og meðallengd (mm) loðnuseiða í ágúst 2008 í Íslandshafi og Grænlandssundi. Togstöðvar eru sýndar með svörtum punktum og meðallengd við stöðvar þar sem loðnuseiði fengust. Brúnar tölur og línur sýna reiknuð gildi fyrir meðallengd og útbreiðslulínur meðallengdar. Gráar línur sýna 500 m dýpi. Líkleg rekleið seiða er gefin til kynna með örnum, sem lýsa jafnframt vaxandi stærð seiðanna með staðsetningu í grófum dráttum.

Figure 8. Distribution pattern of 0-group capelin mean lengths (mm) in August 2008 in the Iceland Sea and Denmark Strait. Trawl stations are shown with black dots, and mean lengths are shown at positive stations. Brown numbers and lines indicate calculated values and isolines of mean length. Grey lines indicate 500 m depth. Suggested 0-group drift pattern is indicated by arrows. At the same time the arrows indicate increasing size at position of the 0-group fish.

norðan lands en mikið mældist í Grænlands-sundi. Í ágúst 2003 fundust nánast engin loðnuseiði á hefðbundum slóðum. Þegar loksins var komið í loðnuseiði um 120 sjómílar NNA af Horni mældist talsvert af seiðum á litlum bletti um 68°N og minna magn austur eftir, allt norður af Melrakkasléttu. Trúlega var ekki farið nógu vestarlega árið 2003, en því miður var seiðaleiðingrunum hætt eftir þetta og því engar frekari vísbendingar að hafa úr þeirri átt.

Takmarkað fannst af loðnuseiðum í júlí 2006 og ágúst 2007 (7. mynd a-b). Fyrra árið fundust seiði nokkuð víða eða allt frá landgrunni Austur Grænlands austur fyrir Langanes. Síðara árið var útbreiðslan takmörkuð við djúpslóð norðan lands, en lítið var af seiðum á landgrunninu. Í ágúst 2008 var ástandið allt annað og fundust loðnuseiði á stóru svæði sem náði frá landgrunnsbrún Íslands norðvestan lands allt norður á 69°N og langt inná landgrunn Austur Grænlands, allt vestur á 31°V milli 66°30' og 68°30'N, og þaðan austur að Langanesi (7. mynd c). Mest var af seiðunum yfir Kolbeinseyjarhryggnum um 68°N. Í heild var fjöldi loðnuseiða skv. bergmálgildum 2008 áætlaður



9. mynd. Útbreiðsla (bergmálgildi) eins til þriggja ára loðnu í Íslandshafi í júlí 2006 (a), ágúst 2007 (b) og ágúst 2008 (c). Leiðarlínur (svartar) og 500 m dýptarlínur (rauðar) eru sýndar.

Figure 9. Distributions (echo abundance) of capelin, ages 1-3, in the Iceland Sea in July 2006 (a), August 2007 (b), August 2008 (c). Survey track lines (black) and 500 m depth contour lines (red) are shown.

fjórum sinnum meiri en tvö fyrri árin.

Meðallengd loðnuseiða í ágúst 2008 var talsvert breytileg eftir staðsetningu (8. mynd). Loðnuseiði halda sig nálægt yfirborði eða í efstu 50 m sjávar (Hafrannsóknastofnunin óbirt gögn). Minnstu seiðin, 40-56 mm að meðallengd, veiddust yfir Íslenska landgrunninu og útkanti þess þar sem dýpi er allt að 500 m, út af Vestfjörðum og austur að Melrakkasléttu. Í úthafinu þar fyrir norðan, allt norður á 69°N, voru seiðin mun stærri eða oftast 54-63 mm, en 46 mm í einu tilviki. Seiði á Grænlenka landgrunninu, um og ofan við 500 m dýpi, voru enn stærri eða 59-69 mm. Allra stærstu seiðin (68-69 mm) voru yfir um 500 m dýpi við útkant Grænlenka landgrunnsins. Í stórum dráttum fór stærð seiðanna því vaxandi eftir því sem þau voru lengra norður í Íslandshafi og lengra í vestr á landgrunni Grænlands.

Útbreiðsla eins til þriggja ára loðnu

Mjög lítið mældist af eins árs loðnu (~ 10 milljarðar eða minna), nokkuð víða í júlí 2006 en á afmarkaðri svæðum í ágúst 2007 og 2008 (9. mynd). Í heild mældist lítið af þessum aldursflokki öll árin.

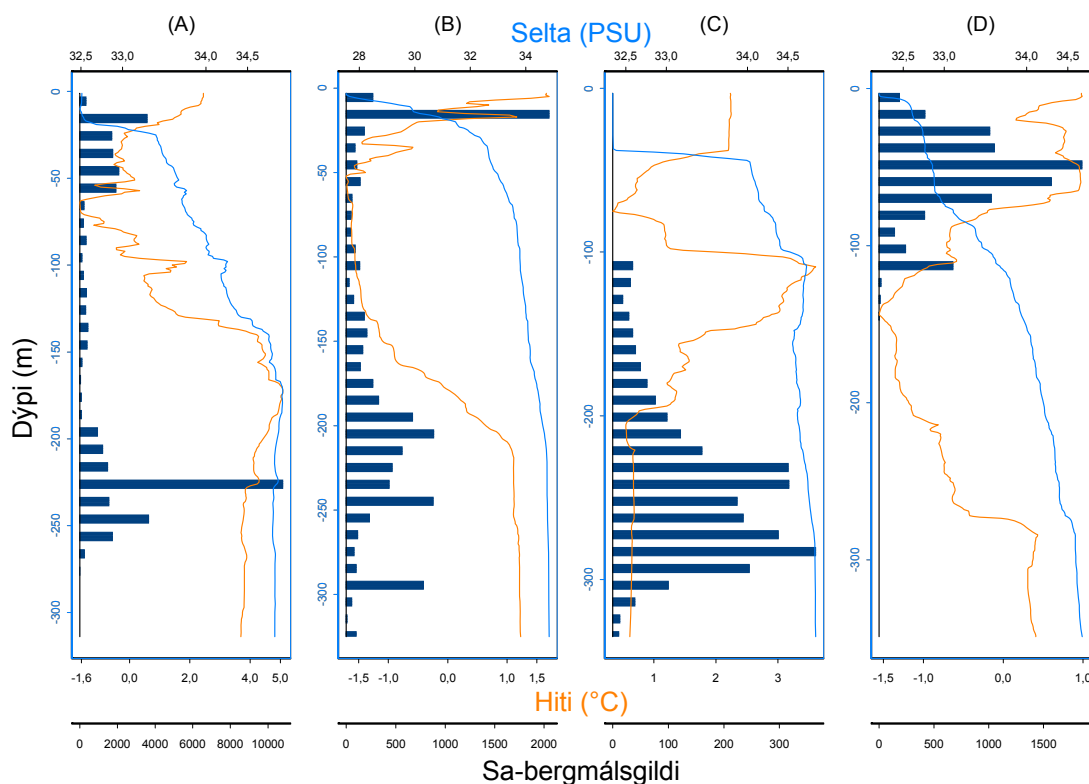
EKKI mældist heldur mikið af tveggja ára

loðnu og helst í takmörkuðum fjölda á tiltölulega afmörkuðum svæðum, suður undir Kulusuk í júlí 2006 (9. mynd a) og við landgrunn Austur Grænlands milli 68° og 70° N í ágúst 2007 (9. mynd b), en á takmörkuðum blettum við landgrunnið milli 66° og 68°N í ágúst 2008 (9. mynd c). Þetta er til marks um að veiðistofninn var í lægð þessi ár, eins og staðfest hefur verið með síðari mælingum og mjög litlum loðnuafli þessi ár.

Sáralítið fannast af þriggja ára loðnu að sumarlagi 2006-2008. Þetta má túlka sem merki um að síðustu árgangar loðnu hafi ekki verið stærri en svo að flestir einstaklingar hafi náð kynþroska við tveggja ára aldur og hrygnt þriggja ára. Þetta var staðfest í aldursrasmætingu hrygningarstofns á vetrarvertíðunum 2007-2009, þegar hrygnandi loðna var nánast eingöngu þriggja ára en afar lítið af fjögurra ára loðnu.

Útbreiðsla og ástand sjávar

Útbreiðsla og göngur loðnu hafa gjarnan verið tengdar meginþáttum í hitafari sjávar, svo sem hita- og straumskilum, enda þótt nákvæmar mælingar á þeim tengslum séu af skornum skammti. Lárétt útbreiðsla eins árs og eldri loðnu reyndist mjög blettótt í Íslandshafi í júlí og ágúst 2006 til 2008 eins og 9. mynd sýnir. Lítið reyndist vera af loðnu neðan við 350 m dýpi og nánast ekkert neðan við 400 m þessi ár og er það svipað og fyrri ár. Á 10. mynd má sjá að lóðrétt útbreiðsla loðnu var breytileg ofan 350 m dýpis og virtist loðnan ýmist halda sig á



10. mynd. Lóðrétt dreifing hita (brún lína), seltu (blá lína) og loðnumagns (Sa-bergmálgildi, dökkar súlur á 10 m dýptarbilum) eftir dýpi. A) Í júlí 2006 sunnarlega á landgrunni A-Grænlands ($65^{\circ}28'N - 35^{\circ}51'V$). B) Í ágúst 2007 við landgrunnskant A-Grænlands í miðju vestanverðu Íslandshafi ($69^{\circ}00'N - 23^{\circ}52'V$). C) Í ágúst 2008 á landgrunni A-Grænlands í Grænlandssundi ($67^{\circ}00'N - 28^{\circ}58'V$). D) Í ágúst 2008 55 sjm. austan við C) ($67^{\circ}00'N - 26^{\circ}40'V$). Staðsetningar sýna hvar hita- og seltumælingar voru gerðar.

Figure 10. Vertical distribution of temperature (brown line), salinity (blue line) and capelin abundance (Sa-echo abundance values, dark columns by 10 m depth intervals). A) In July 2006 on the southern East Greenland shelf ($65^{\circ}28'N - 35^{\circ}51'V$). B) In August 2007 at the East Greenland shelf edge in the central western Iceland Sea ($69^{\circ}00'N - 23^{\circ}52'V$). C) In August 2008 on the East Greenland shelf in the Denmark Strait ($67^{\circ}00'N - 28^{\circ}58'V$). D) In August 2008 55 nm. east of C) ($67^{\circ}00'N - 26^{\circ}$

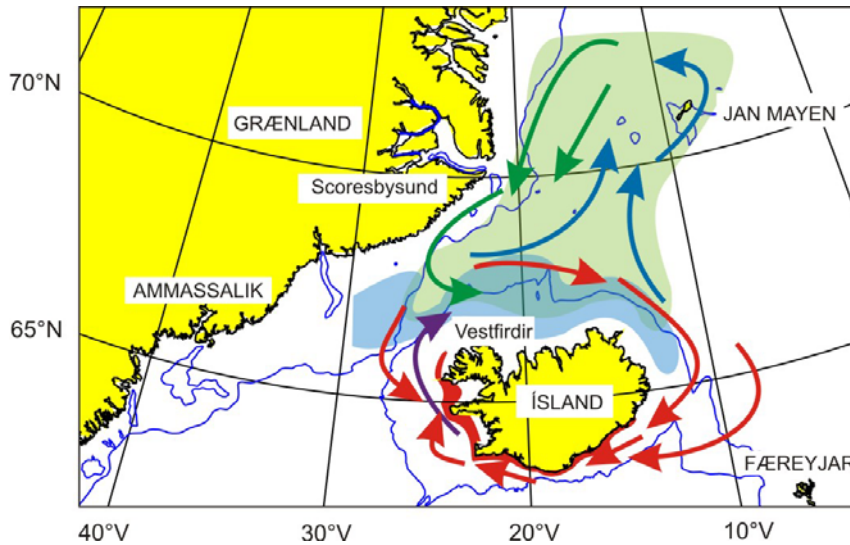
litlu dýpi ofan við 100 m eða á mun meira dýpi um og yfir 200 m og allt niður á 300 m.

Tengsl dýptardreifingar loðnu við hita og seltu eru ekki einhlít með hliðsjón af 10. mynd. Myndin sýnir magn loðnu eftir 10 m dýptarbilum á nokkrum völdum svæðum (á leiðarlínum allt að 40 sjm. að lengd) þar sem magn loðnu var tiltölulega mikið, og hitastig og seltu á stöðvum innan þessara svæða, oftast á einni stöð á hverju svæði. Í júlí 2006, sunnarlega á landgrunni Austur Grænlands, var stór hluti loðnunnar á 190-260 m dýpi við um $4^{\circ}C$, en einnig var talsvert af loðnu ofan við 60 m við $<0^{\circ}C$ (10. mynd A). Í ágúst 2007, við landgrunnskant Austur Grænlands um miðbik Íslandshafs, var stór hluti loðnunnar á >200 m dýpi við um $1^{\circ}C$, og einnig hámark á 10-20 m í kröppum hitaskilum (10. mynd B). Í ágúst 2008, á landgrunni Austur Grænlands í Grænlandssundi, var loðnan mest á 200-300 m dýpi við um $0,5^{\circ}C$ (10. mynd C). Á stöð nokkru austar (10. mynd D) var mest af loðnunni ofan við 100

m við $0-1^{\circ}C$. Þetta gefur til kynna að nokkur breytileiki sé í umhverfishitastigi loðnunnar á þessum árstíma og að loðnu megi finna í talsverðum mæli á hitabilinu -1 til $4^{\circ}C$, en þó aðallega á bilinu -1 til $1,5^{\circ}C$. Seltuferlar eru svipaðir í þessum fjórum dæmum og selta vaxandi með dýpi. Loðnan er því í tiltölulega lágru seltu, eða allt niður í um 28,0 á minnsta dýpinu, en í 34,50-34,85 á meira dýpi.

Umræða

Útbreiðsla loðnuseiða í júlí og ágúst 2006 til 2008 var mun norðlægari en áður hefur mælst, sérstaklega 2007 og 2008. Fremur lítið var af loðnuseiðum á landgrunninu og útbreiðslan ekki ósvipuð því sem var í ágúst 2003 að þessu leyti (Sveinn Sveinbjörnsson & Einar Hjörleifsson 2003). Viðáttumikil útbreiðsla yfir á landgrunn Austur Grænlands var einnig meiri en fyrri seiðarannsóknir á tímabilinu 1970-2003 gáfu til kynna. Þessar niðurstöður benda til þess að á árunum frá síðustu aldamótum hafi loðnuseiðin



11. mynd. Aðaldrættir í útbreiðslu og göngum loðnunnar fram um seinustu aldamót. Ljósblátt: Uppeldissvæði loðnu á 1. og 2. ári. Grænt: Ætissvæði fullorðinnar loðnu. Bláar örvar tákna ætisgöngur en grænar örvar göngur til baka í átt að Íslandi að hausti. Rautt: Hrygningargöngur og hrygningarslóðir loðnunnar. Fjólubláar örvar: Seiðarek (Hjálmar Vilhjálmsson 2002, nokkuð breytt).

Figure 11. Main patterns in distribution and migration of capelin until the turn of the last century. Light blue: Nursery area. Green: Feeding grounds of adult capelin. Blue arrows indicate feeding migrations and green arrows autumn returning migrations towards Iceland waters. Red: Spawning migrations and areas. Violet arrows: 0-group drift (Modified after Vilhjálmsson 2002).

rekið í vaxandi mæli yfir á landgrunn Austur Grænlands en í minna mæli venjulega leið norður og norðaustur fyrir land.

Útbreiðsla seiða eftir stærð (meðallengd) þeirra í ágúst 2008 styrkir þessa túlkun enn frekar, en hún gefur til kynna að minnstu seiðin, út af Vestfjörðum og norðaustan lands, séu af síðbúinni hrygningu vestan lands og við austanverða norðurstöndina. Með hliðsjón af norðlægri og vestlægri útbreiðslu stærri seiða má telja líklegt að þau séu frá hrygningu sunnan lands eða suðvestan fyrir á hrygningartímanum. Líklegt er að rekleiðin sé um landgrunnið og með landgrunnsbrún norður fyrir land, allt austur undir Kolbeinsey, síðan norðureftir vestan við Kolbeinseyjarhrygg og loks vesturum yfir á landgrunn Austur Grænlands. Líklegt má telja að stærstu seiðin (68-69 mm), sem fengust við grænlenka landgrunnskantinn, hafi fylgt norðlægri rekleið af þessum toga. Á hinn bóginn kann að vera að rekleið minni seiða (59-61 mm), vestar á Grænlenka landgrunninu, hafi verið suðlægari, þ.e. að þau hafi rekið í vestur eða norðvestur út af Vestfjörðum og yfir á grænlenka landgrunnið með svipuðum hætti og oft varð vart í seiðaleiðöngrum fyrri ára, t.d. árið 1981 (Hjálmar Vilhjálmsson & Jutta V. Magnússon 1981). Athyglisvert er að fá seiði fengust austan Kolbeinseyjarhryggs. Niðurstöður á grundvelli rekdufla frá 1995-1996 gefa til kynna að rekleið af ofangreindum toga sé líkleg (Hédinn Valdimarsson & Svend-Aage Malmberg 1999), auk þess sem ætla má að aukið innstreymi Atlantssjávar norður fyrir land á síðari árum hafi valdið aukningu í þessu tilliti. Þá eru niðurstöður um norðlægáan straum á

sunnanverðum Kolbeinseyjarhrygg athyglisverðar í þessu samhengi og styrkja tilgátu um slíka rekleið (Hédinn Valdimarsson & Steingrímur Jónsson 2012).

Á fyrri árum, þegar loðnustofninn var upp á sitt besta, safnaðist stofninn (allir aldursflokkar) yfirleitt saman á haustin úti af Norðurlandi og stundum einnig vestur í Grænlandssundi. Þarna var um langt skeið tiltölulega auðvelt að bergmálsmaða fjölda smáloðnunnar (aðallega aldursflokkur 1) sem síðan var notaður til að spá um loðnugengd næstu vertíðar með góðum árangri - þar til fyrir nokkrum árum. Á þriðja sumri æviskeiðsins fór meiri hluti fullorðnu loðnunnar í langar ætisgöngur norður í Íslandshaf og sneri síðan til baka að haustinu, oftast vestar en á útleiðinni. Til síðustu aldamóta, eða þar um bil, lá bakaleiðin suður á utanvert landgrunnið norðanlands og úti af Vestfjörðum í október-nóvember, en þaðan lagði hrygningargangan af stað í desember, venjulega austur og síðan suðaustur yfir utanverðu landgrunninu norðan- og norðaustanlands, en að mestu utan við kantinn úti af Austfjörðum uns komið var að hlýsjónum suður á móts við Hvalbak. Þaðan gekk loðnan svo seint í janúar eða í byrjun febrúar á hrygningarstöðvarnar í hlýsjónum sunnanlands og vestan. Stöku sinnum komu stórar hrygningargöngur vestan að, en það var fremur sjaldgæft. Þar til um síðustu aldamót var göngumynstur og dreifing loðnunnar að jafnaði eins og sýnt er á 11. mynd.

Í árána rás hafa vitanlega orðið frávik frá

Þessum almenna lífsferli loðnunnar sem miðast við tímabilið frá 1965 þar til fram um eða nokkuð yfir seinustu aldamót. Sem dæmi má nefna að ætissvæðið norður í Íslandshafi hefur legið misvestarlega og ætisgangann einstaka sinnum ekki náð nema skammt norður fyrir 68° N þótt reglan hafi verið 71-72°N. Í báðum tilfellum virtist þetta ráðast af hitafari um og norðan við 68°N (Hjálmar Vilhjálmsson 1994, 2002). Þá má nefna að í byrjun janúar hefur hrygningargangann fundist allt frá Austfjarðamiðum (sem taldist vanalegt) og NV af Halanum (67°30'N, 24°30'V) og munar þarna um 300-400 sjómílum. Þessar síðbúnu hrygningargöngur voru sérstaklega áberandi veturna 1978-1980 og tengdust að öllum líkum óvenjulega vestlægri dreifingu fullorðnu loðnunnar sem mest var af sitt hvoru megin Grænlandssundsins vestur af Vestfjörðum í nóvember-deseember 1977-1979 (Hjálmar Vilhjálmsson 1994). Þá hefur oltið á ýmsu um hvað langt hrygningargöngurnar náðu vestur með Suðurlandi. Sem dæmi má nefna veturna 1970 og 1978 þegar sáralítið hrygndi vestan við Skarðsfjöru og ekkert vestan við Dyrhólaey. Enda þótt stofnmælingar væru ekki hafnar á þessum tíma er lítil vafi á að stofninn var í lægð í báðum tilfellum og kynþroskastig hrygnanna óvenju hátt þegar þær komu inn í hlýsjóinn úti af Lónsvík (Hjálmar Vilhjálmsson 1994). Síðan hefur það nokkrum sinnum hent að hrygningargöngurnar næðu ekki vestur fyrir Reykjanes. Það liggur engan veginn ljóst fyrir hvað veldur þessu. Upphaflega var talið að þetta tengdist vestlægri dreifingu fullorðnu loðnunnar haustið áður og/eða litlum stofni, en síðan hafa tregar vesturgöngur oft tengst stífum vestanáttum sem hægja mjög á, stöðva eða jafnvel snúa til austurs strandraumnum sem venjulega rennur ákveðið vestur með suðurströndinni.

Haustið 2002 bar svo til að mjög lítið fannst af unglöðnu (eins árs) á venjulegum slóðum og enn minna árin 2003 og 2004. Talsverðu púðri var eytt í að hafa upp á smáloðnunni haustin 2002-2005, oft með aðstoð leitar skipa úr veiðiflotanum, en með litlum árangri. Veður eru oftast vond í Grænlandssundi og þar vestur af í nóvember-deseember og ekki var venja að kanna þau svæði nákvæmlega á þeim árstíma nema vel rökstuddur grunur væri um að þar væri eitthvað af loðnu, sem aðgengileg væri til mælinga.

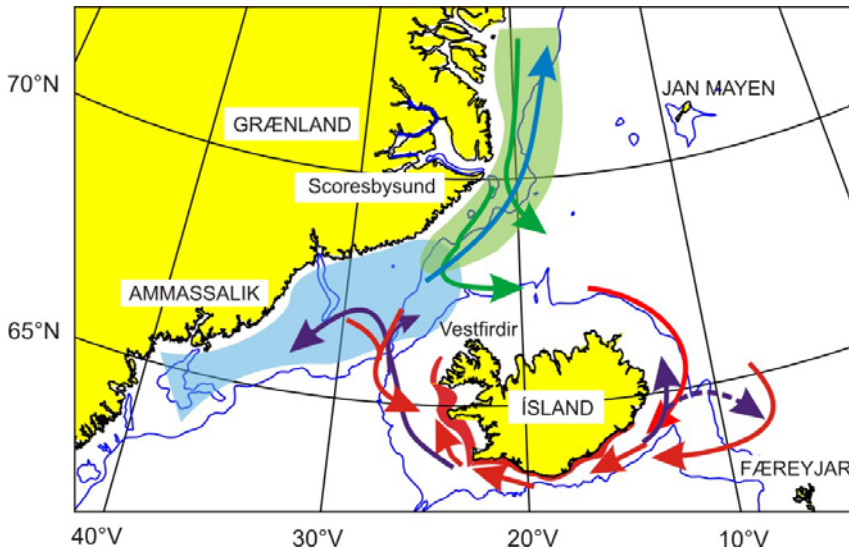
Árgangarnir 2001 og 2002 fundust síðan í Grænlandssundi sem 2 ára loðna í apríl 2003 og

júni/júlí 2004, í seinna tilvikinu með aðstoð 5 skipa úr veiðiflotanum (Anon. 2003, 2005a) og var því hægt að leggja til nokkra sumarveiði. Þessir árgangar skiluðu sér síðan í eðlilegum fjölda sem fullorðin loðna veturna 2004 og 2005. Árgangurinn frá 2003, sem hrygndi þriggja ára 2006, virðist hinsvegar hafa verið afar slakur. Ekkert var hægt að leita vorið og sumarið 2005 vegna hafiss á þessu svæði og víðar og engin veiði leyfð þá um sumarið. Árgangurinn frá 2003 fannst því ekki fyrr en sem kynþroska fiskur í hrygningargöngu veturinn 2006 enda mikill ís í Grænlandssundi og norður af Vestfjörðum langt fram á sumar 2005.

Fyrir utan kynþroska fisk í ætisleit seinasta sumarið fyrir hrygningu, vakti það sérstaklega athygli við leit og mælingar á kynþroska 2 og 3 ára loðnu, að í júní/júlí 2004 fannst talsvert af árgamalli loðnu (seiðum frá fyrra ári) þar sem farið var næst Grænlandi vestan við Grænlandssund. Svipað var uppi á teningnum í leiðangri sem farinn var um Grænlandsflákann á vegum Grænlandinga í september 1985 (Friis-Rødel & Kannevorff 2002).

Önnur mjög áberandi breyting sem orðið hefur á seinni árum (frá og með 1998) er sú að nær ekkert hefur fundist né veiðst á haustin (október-deseember) miðað við það sem áður var og nær eingöngu djúpt úti af Melrakkaslétu í desember. Þetta gerðist þrátt fyrir viðamikla leit veiði- og rannsókn skipa, bæði í Íslandshafi og Grænlandssundi. Á þessu er þó sú undantekning að seint um haustið 2004 leitaði Huginn frá Vestmannaeyjum vestastur skipa norður með Austur Grænlandi. Ekki fundu þeir mikið af loðnu, en þó samfelldar lóðningar allt þar til þeir urðu að gefast endanlega upp suðaustur af Scoresbysundi vegna ísreks og brælu. R/s Árni Friðriksson fór nánst í kjölfar Hugans VE og staðfesti að þetta væri fullorðin loðna á hægri suðurgöngu. Loðnan safnaðist síðan saman um 50-80 sjómílur N af Straumnesi og veiddu fáein skip þarna fram undir jól. Um og upp úr áramótunum hélt hrygningarloðnan síðan austur eftir um utanvert landgrundið og var henni fylgt af leitar skipum á leiðinni – í eina skiptið í mörg ár áður og aldrei síðan.

Því bendir flest til þess að í stað þess að reka norður og austur fyrir land hafi langmestur hluti 2001-2003 árganganna rekið vestur á bóginn og alist upp á Grænlandsflákanum frá því norður af Dohrnbanka og vestur undir Ammassalik eða jafnvel enn lengra suðvestur meðfram strönd



Grænlands. Tveir þeir fyrrnefndu hafa ekki orðið fyrir miklum afföllum umfram það sem venjulegt getur talist. Árgangurinn frá 2003 var hins vegar lítill sem trúlega leiddi til mjög hárrar meðalþyngdar (21,3 g) sem er sú langmesta sem sést hefur frá upphafi (Anon. 2006, Tafla 3.20.7).

Þær breytingar á „venjulegri útbreiðslu og hrygningargöngum“ loðnunnar sem að ofan greinir, og sýndar eru á 12. mynd, hafa að mestu verið viðvarandi síðan. Ennfremur hafa orðið fleiri en ekki eins augljósar breytingar á „eðlilegri“ hegðun loðnunnar. Á seinni árum hafa hrygningargöngurnar t.d. ekki komið eins nærri landgrunninu norðaustanlands og austan og þaðan af síður upp á utanvert grunnið eins og venja var áður en göngurnar héldu áfram vestur á við upp að suðausturströndinni. Í annan stað hafa göngurnar verið síðbúnari en venjulega og hafa hrygningargöngurnar stundum ekki náð vestur á Faxaflóa eða í Breiðafjörð en það hefur raunar gerst áður. Upp á síðkastið hefur loðnan ekki myndað hinar afar þéttu torfur sem dæmigerðar voru fyrir gönguna vestur með landinu og var þá gjarnan talað um fyrstu, aðra og þriðju göngu. Á þessu geta að sjálfsögðu verið ýmsar skýringar, en nærtækt er að ímynda sér að slíkt gerist frekar þegar lítið er af loðnu eins og veturna 1978 og 1980 og verið hefur eftir 2004. Einnig hefur hluti stofnsins líklega hrygnt um tveimur vikum fyrr en venjulega og hluti hans á grunnunum suðaustanlands. Undir venjulegum kringumstæðum gerist slíkt líklega helst þegar hluti göngunnar fer djúpt fyrir Austfirði og Suðausturland og mótdrægt er þar austurfrá eins og veturinn 2004. Þá fannst og mældist stór

12. mynd. Tilgáta að breytingum á aðaldráttum í útbreiðslu og göngum loðnunnar seinustu árin. Blátt: Uppeldissvæði. Grænt: Ætissvæði fullorðinnar loðnu. Ætisgöngur að vor og sumarlagi eru sýndar með bláum örvm, en örvarnar sem sýna göngur af ætissvæðunum á haustin eru grænar. Rautt: Hrygningargöngur (örvar) og aðal hrygningarslóðir loðnunnar (rauð svæði). Fjólubláar örvar: Seiðarek.

Figure 12. A hypothesis for changed patterns of distribution and migration of capelin in recent years. Blue: Nursery area. Green: Feeding grounds of adult capelin. Spring and summer feeding migrations are indicated by blue arrows, but autumn returning migrations by green arrows. Red: Spawning migrations (arrows) and main spawning areas. Violet arrows: 0-group drift.

ganga (5-600 þús. tonn) milli 7°30'V og 8° 45'V, rétt norðan við Færeysku lögsöguna. Hinn hluti hrygningargöngunnar var þá kominn á leið upp að og vestur með landi, en eystri gangan kom aldrei fram á venjulegum hrygningarslóðum úti af Suður- og Vesturlandi svo vitað sé.

Ætla má að hrygningargangan hefjist fyrr en ella vegna herra hitastigs og loðnan bæti sér á þann hátt lengri gönguleiðir seinni ára. Þrátt fyrir þetta hafa fyrstu göngurnar verið fremur síðbúnar upp á síðkastið og loðnan oftari hrygnt tiltölulega snemma og austar en var. Á árunum 2008-2009 og sérstaklega 2010, kom þétt torfa á eðlilegum tíma, þ.e. í fyrstu viku febrúar, upp að austanverðri suðurströndinni. Í þessari fyrstu göngu hafa aðeins mælt inn við 100 þúsund tonn. Seinni göngur hafa verið dreifðar á stóru svæði austanlands. Þetta var einkum áberandi vorið 2010 þegar fyrsta gangan kom inn í hlýsjóinn suðaustanlands 3. febrúar, en loðnudreif fannst svo þaðan austur og norður um, allt norðaustur af Langanesi. Á öllu þessu svæði var kynþroska loðna, lítið blönduð ókynþroska loðnu, syðst en vaxandi blöndun eftir því sem norðar dró. Þessi loðna var að síast inn á grunnið fram eftir febrúar og fram í mars og hefur sjálfsagt líka hrygnt eitthvað fyrir suðausturlandi. Þar af leiðir að herra hlutfall loðnulirfa kleksti, vex og rekur við önnur upphafsskilyrði en áður, með þeim afleiðingum sem

fyrir er lýst. Þessar breytingar hafa leitt til þess að loðna, bæði ungstig og fullorðinn fiskur, er nú í minna mæli aðgengileg sem fæða fyrir þorsk og aðra fiskstofna og hefur það dregið mælanlega úr vexti þorsks a.m.k. (Anon. 2010).

Útbreiðsla tveggja og þriggja ára loðnu að sumarlagi 2006–2008 er til marks um að veigamikil breyting hefur orðið á útbreiðslu eldri hluta stofnsins, þ.e. veiði- og hrygningarstofnsins, frá því sem áður var venjan. Á árum áður náði sumarætissvæði loðnunnar langt norður fyrir Scoresbysund (70°N) og austur að Jan Mayen, (Hjálmar Vilhjálmsson 1994, 2002) en á síðustu árum hefur það verið mun sunnar og vestar í námunda við landgrunn Austur Grænlands.

Samanburður á nokkrum lífsögulegum þáttum, þ.e. lengd, þyngd og holdastuðlum eftir aldri, fæðu og fituhlutfalli, sýnir að nokkur undanfarin ár (2006–2008) voru þessir þættir í meginatriðum innan þeirra marka sem mældust á fyrri árum loðnurannsóknna. Helsta frávikid er að eins árs loðna var mun stærri (lengri og þyngri) á undanförunum árum en tímabilið 1979–1999. Þar sem eldri loðna sýnir ekki samsvarandi breytingu, virðist sem umhverfisáðstæður hafi einkum komið eins árs loðnu til góða. Ekki er þó ljóst um hvaða umhverfisþætti er hér að ræða. Hvað sem því líður virðist óhætt að álykta að langtíma lífsögulegt ástand eins árs og eldri loðnu hafi verið tiltölulega stöðugt undanfarna þrjá áratugi, þrátt fyrir talsverðan árlegan breytileika.

Á hinn bóginn er ljóst að fjöldi og útbreiðsla loðnu hefur breyst mikið síðustu 5–10 árin eða þar um bil, miðað við fyrri ár, og er í megindráttum mun vestlægari og suðlægari og loðna fannst ekki austan Kolbeinseyjarhryggjar sumurin 2006–2008. Gróflega má áætla, með hliðsjón af niðurstöðum stofnmælinga og loðnuaflla, að stofninn hafi minnkað um a.m.k. helming á árunum 2004–2009 (Anon. 2010). Loðnuárgangar hafa verið mun minni síðustu ár, eða allt frá árinu 2003, og er hnignun í nýliðun það mikil að jafngildir nýliðunarbrestri. Árgangur 2009 var þó mun sterkari en nokkrir fyrri árgangar. Athygli vekur að tímabil lakari nýliðunar hófst árið sem loðnuseiði fundust ekki að marki á landgrunni Íslands og jaðarsvæðum þess. Því er freistandi að álykta að norðlæg útbreiðsla seiða og rek þeirra til Austur Grænlands, á nýjar (sennilega lakari) uppeldisstöðvar, séu þættir í orsakaferli sem leitt hefur til nýliðunarbrestsins.

Upphaf þessa orsakaferlis er óljóst, en nærtækt er að ætla að það sé á fyrstu mánuðum í lífsögu loðnunnar og á landgrunni Íslands fremur en í Íslandshafi, þ.e. á svæðum og tímasteiði hrygningar, klaks og lirlifureks, með tengslum við hlýnun sjávar, breytingar á straumum og innstreymi í Íslandshaf.

Þakkir

Höfundar þakka þeim fjölmörgu starfsmönnum Hafrannsóknastofnunarinnar sem tóku þátt í þessari rannsókn á loðnustofninum, ekki síst skipstjórum og áhöfnum rannsóknaskipanna Bjarni Sæmundsson og Árni Friðriksson sem og öðrum þátttakendum við gagnasöfnun og úrvinnslu gagna og ýmis önnur störf. Þorsteinn Sigurðsson las handritið yfir og gaf margar góðar ábendingar.

Þessi ritsmíð mun vera ein sú síðasta sem Dr. Hjálmar Vilhjálmsson (1937–2011) vann að á ferli sínum sem fiskifræðingur. Hjálmar skrifaði lungann af inngangi og umræðu greinarinnar um mitt ár 2010. Má því líta svo á að hér komi fram lokasýn hans á þróun og ástand loðnustofnsins til þess tíma.

Heimildir

- Anon. 2003. Report of the Northern Pelagic and Blue Whiting working group. ICES CM 2003/ACFM: 23.
- Anon. 2005a. The Annual ICES Ocean Climate Status Summary 2004/2005. *ICES Cooperative Research Report* no 275.
- Anon. 2005b. Report of the North Western Working Group. ICES CM 2005/ACFM: 21.
- Anon. 2006. Nytjastofnar sjávar 2005/2006. Aflahorfur fiskveiðiárið 2006/2007 (State of Marine Stocks in Icelandic Waters 2005/2006. Prospects for the Quota Year 2006/2007. In Icelandic with English subtitles). *Hafrannsóknastofnunin, Fjölrit (Marine Institute Report Series)* nr. 125.
- Anon. 2010. Nytjastofnar sjávar 2009/2010. Aflahorfur fiskveiðiárið 2010/2011 (State of Marine Stocks in Icelandic Waters 2009/2010. Prospects for the Quota Year 2010/2011. In Icelandic with English subtitles). *Hafrannsóknir (Marine Research in Iceland)* nr. 153.
- Árni Friðriksson 1943. Contributions to the knowledge of the Icelandic capelin (*Mallotus vill-osus* (O. F. Müller)). *Rit Vísindafélags Íslendinga*, 2: 189–197.

- Bjarni Sæmundsson 1926. *Fiskarnir (Pisces Island-iae)*. Bókav. Sigfúsar Eymundssonar, Reykjavík, 583 bls.
- Bjarni Sæmundsson 1934. Probable influence of changes in temperature on the marine fauna of Iceland. *Rapports et Proces-Verbaux* 86 (1): 1-6.
- Dodson, J. J., Tremblay, S., Colombani, F., Carscadden, J. E. & Lecomte, F. 2007. Trans-Arctic dispersals and the evolution of a circumpolar marine fish species complex, the capelin (*Mallotus villosus*). *Molecular Ecology* 16: 5030–5043.
- Eyjólfur Friðgeirsson 1974. Observations on spawning behaviour and embryonic development of the Icelandic capelin. *Rit Fiskideildar* 5(4): 3-16.
- Friis-Rødel, E. & Kanneworff, P. 2002. A review of capelin (*Mallotus villosus*) in Greenland waters. *ICES Journal of Marine Science* 216: 890-896.
- Héðinn Valdimarsson & Steingrímur Jónsson 2012. Ástand sjávar og straumar í Íslandshafi. Hafrannsóknir nr. 164: 14-29.
- Héðinn Valdimarsson, & Svend Aage Malmberg 1999. Near-surface circulation in Icelandic waters derived from satellite tracked drifters. *Rit Fiskideildar* 16: 23-39.
- Hjálmar Vilhjálmsson 1994. The Icelandic capelin stock. Capelin *Mallotus villosus* (Muller) in the Iceland, Greenland, Jan Mayen area. *Rit Fiskideildar*, 13(1) 281 bls.
- Hjálmar Vilhjálmsson 2002. Capelin (*Mallotus villosus*) in the Iceland–East Greenland–Jan Mayen ecosystem. *ICES Journal of Marine Science* 216: 870-883.
- Hjálmar Vilhjálmsson & Eyjólfur Friðgeirsson 1975. A review of 0-group surveys in the Iceland-East-Greenland area in the years 1970-1974. *ICES CM* 1975/H:34.
- Hjálmar Vilhjálmsson & Jutta V. Magnússon 1981. Report on the 0-group survey in Icelandic and East Greenland waters, August 1981. *ICES C.M.* 1981/H:41.
- Jensen, Ad. S. 1939. Concerning a change of climate during recent decades in the Arctic and Sub-arctic regions, from Greenland in the west to Eurasia in the east, and contemporary biological and physical changes. *Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Biologiske Meddelelser* 14(8): 1-77.
- Jespersen, P. 1920. On the occurrence of the post larval stages of the herring and the “lodde” (*Clupea harengus* L. and *Mallotus villosus* O. F. M.) at Iceland and the Faroes. *Meddelelser fra Kommissionen for Havundersøgelser. Serie Fiskeri* 6(1): 1-25.
- Jutta Magnússon 1966. On capelin larvae (*Mallotus villosus*, O.F. Müller) in Icelandic waters during the years 1960 to 1964. *Rit Fiskideildar* 4(4): 1-36.
- Kjartan Thors 1981. Environmental features of the capelin spawning grounds south of Iceland. *Rit Fiskideildar* 6 (1): 7-13.
- Mork, K. A. 2006. Fysikk (sirkulasjon, vannmasser og klima) i Ökosystem Norske havet. *Havets ressurser og miljø 2006*.
- Le Cren, E. D. 1951. The length–weight relationship and seasonal cycle in gonad weight and condition in the perch (*Perca fluviatilis*). *Journal of Animal Ecology* 20: 201–219.
- Ólafur S. Ástþórsson & Ástþór Gíslason 1997. On the food of capelin in the sub-Arctic waters north of Iceland. *Sarsia* 82: 81-86.
- Sveinn Sveinbjörnsson & Einar Hjörleifsson 2001. Report on the 0-group fish survey in Icelandic waters, August-September 2001. Addendum to the NWWG-report. *ICES C.M.* 2001/ACFM: 20.
- Sveinn Sveinbjörnsson & Einar Hjörleifsson 2002. Report on the 0-group fish survey in Icelandic waters, August 2002. Addendum to the NWWG-report. *ICES C.M.* 2002/ACFM: 20.
- Sveinn Sveinbjörnsson & Einar Hjörleifsson 2003. Report on the 0-group fish survey in Icelandic waters, August 2003. Addendum to the NWWG-report. *ICES C.M.* 2003/ACFM: 20.

Líkön og hermanir af göngum, vexti og kynþroska loðnu.

Baldvin Einarsson^{1,2}, Alethea Barbaro^{2,3}, Björn Birnir^{1,2} og Sven Sigurðsson¹.

¹ Háskóli Íslands

² Kaliforníuháskóli, Santa Barbara, USA

³ Nú við Kaliforníuháskóla, Los Angeles, USA

Ágrip

Baldvin Einarsson, Alethea Barbaro, Björn Birnir og Sven Sigurðsson. Líkön og hermanir af göngum, vexti og kynþroska loðnu. Hafrannsóknir nr. 164.

Sett er fram eindalíkan fyrir göngu loðnu (*Mallotus villosus*) í kringum Ísland og líkan sem lýsir vexti og kynþroska stakra fiska og byggir á aðferðafræði um kvikan orkubúskap. Eindalíkanið er notað til þess að líkja eftir hrygningargöngu loðnunnar veturna 1984-1985, 1990-1991 og 2007-2008. Góð mynd fæst af göngunum út frá tiltækum hitastigsgögnum og nálg-un á straumum við Íslandsstrendur. Ólíkt eldri líkönum er ekki stuðst við sérstakt aðdráttarsvið að hrygningarstöðvum. Í líkankeyrslunum er fjöldi einda líka mun meiri en í hermunum svipaðra líkana, sem birtar hafa verið, og hefur fjöldinn áhrif á viðfeðma hegðun kerfisins. Vaxta- og kynþroska-líkanið er felld að gögnum um fituinnihald og hrognþroska loðnu í hrygningargöngu veturinn 1999-2000. Loks er því lýst hvernig fella megi saman líkönin tvö til þess að fá betri mynd af göngu-hegðun loðnunnar.

Abstract

Baldvin Einarsson, Alethea Barbaro, Björn Birnir and Sven Sigurðsson. Modelling and simulations of the migration, growth and maturity of capelin. Marine research in Iceland no. 164. We present an interacting particle model for the migration of the Icelandic capelin stock (*Mallotus villosus*) and a model describing the growth and development of individual fish based on the methodology referred to as Dynamic Energy Budget (DEB) modelling. The particle model is applied to simulating the spawning migration route for the years 1984-1985, 1990-1991 and 2007-2008. With available temperature data and approximated currents, our model was able to reproduce the observed migration routes from all three years, successfully predicting the route for 2008. Unlike previous models, we do not use artificial forcing terms or a homing instinct towards spawning grounds. The simulations further include orders of magnitude more particles than similar models, which affects the global behaviour of the model. The growth and development model is fitted to data on fat content and roe maturity from the 1999-2000 spawning migration. Finally, we describe how these

two models may be integrated in order to model capelin migrations more fully the migration patterns of the capelin.

Inngangur

Mikilvægi hins íslenska loðnustofns, sem hrygnir árlega við suðurströnd landsins, er geysimikið fyrir efnahag landsins sem og lífríki hafsins kringum Ísland. Til eru ítarlegar og greinargóðar lýsingar á gönguhegðun hins íslenska loðnustofns, aflabrögðum og stofnmati (Hjálmar Vilhjálmsson 1994, 2002, Hjálmar Vilhjálmsson & Carscadden 2002). Hér stiklum við því á stóru í lýsingu á lífsferli loðnunnar.

Árlega leitar þriggja til fjögurra ára gömul loðna norður til hafsvæðisins við Jan Mayen í fæðuleit. Eftir að hafa étið nægju sína leitar hún að Íslandsströndum að hausti til þess að hrygna við suður- og vesturströnd landsins. Er hér um mikinn orkuflutning að ræða sem hefur mikil áhrif á vöxt og viðgang annarra fiskistofna. Loðnan er því mikilvægur þáttur í fæðunámi fjölmargra fisktegunda, sér í lagi þorsks (Kjartan G. Magnússon & Ólafur K. Pálsson 1991, Kjartan G. Magnússon og Thor Aspelund 1997).

Gönguhegðun loðnunnar er háð bæði hitastigi og fæðuskilyrðum og geta því breytingar á sjávarskilyrðum haft mikil áhrif á göngumynstrið. Mikilvægur þáttur í því að skýra þetta samband og spá fyrir um mögulegar breytingar í framtíðinni er að setja fram reiknilíkan af göngu loðnunnar. Það líkan, sem lýst er í þessari grein, er svonefnt eindalíkan, þar sem hver eind svarar til staks fisks eða hóps af fiskum. Það byggir annars vegar á ýmsum eindalíkönnum sem sett hafa verið fram á undanförunum árum til að líkja eftir göngum fiska (Aoki 1982, Huth & Wissel 1992, 1994, Couzin o.fl. 2002, Kunz & Hemelrijk 2003, Hemelrijk & Kunz 2005, Kunz o.fl. 2006, Hemelrijk & Hildenbrandt 2008, Viscido o.fl. 2004, 2005), en fjöldi einda í þeim hermunum sem hér er lýst er nokkrum stærðargráðum meiri en í hermunum ofan-

greindra líkana. Þá koma áhrif hitastigs ekki við sögu í fyrrgreindum líkönum en þau áhrif skipta miklu máli í gönguhegðun loðnu. Hins vegar er byggt á reiknilíkönunum sem þróuð voru á Raunvísindastofnun Háskólans af rannsóknahópi Kjartans G. Magnússonar á árunum 2000-2004 til að lýsa göngum loðnu við strendur Íslands og í Barentshafi, bæði með eindum og samfelldu þéttleikafalli (Sven Sigurðsson o.fl. 2002, Hubbard o.fl. 2004, Kjartan G. Magnússon o.fl. 2004, Kjartan G. Magnússon o.fl. 2005). Í þessum líkönum eru áhrif hitastigs meðhöndluð á hliðstæðan hátt og í því eindalíkani sem hér er lýst, en mikilvægt frávík frá þeim líkönum er að ekki er stuðst við sérstakt aðdráttarsvið að hrygningarstöðvum, auk þess sem fjöldi einda er mun meiri. Að lokum er byggt á eindalíkani, samfelldu í tíma, sem Björn Birnir hefur sett fram, og leiðir í ljós ýmis áhugaverð stöðugleikamunstur í kvikri hegðun slíkra eindahópa (Björn Birnir 2007).

Kynþroski loðnunnar hefur mikilvæg áhrif á gönguhegðun hennar, t.d. varðandi það hvenær hrygningarganga hefst og í hvaða sjávarhitastig loðnan leitar. Ef vel á að vera þarf því að tengja við hverja eind eindalíkansins tímaháða stika sem lýsa t.d. hrognainnihaldi hennar. Hér er því sett fram reiknilíkan fyrir vöxt og kynþroska loðnu, sem byggir á aðferðafræði sem kennd er við kvikan orkubúskap (Kooijman 2010), og er þá sér í lagi byggt á líkani sem hefur verið sett fram um vöxt og kynþroska ansjósu í Biskajafloa (Pecquerie o.fl. 2009). Í þessari grein er fyrst stutt lýsing á eindalíkaninu og líkaninu fyrir vöxt og kynþroska. Síðan er fjallað ítarlega um niðurstöður hermána með eindalíkaninu af hrygningargöngu loðnunnar veturna 1984–85, 1990-91 og 2007-08 en sú umfjöllun er að mestu þýðing á efni sem birtist í Barbaro o.fl. (2009) og birst hefur að hluta í doktorsritgerð Aletheu Barbaro (Barbaro 2008). Síðan er gerð grein fyrir því hvernig stikar vaxtar og þroskalíkansins hafa verið aðlagðir gögnum um fitu- og hrognainnihald loðnu frá vetrinum 1999-2000, sem er að mestu þýðing á Baldvin Einarsson o.fl. (2011). Loks er stutt umfjöllun um hvernig tengja meg þessi tvö líkón saman til að fá fram fyllri mynd af gönguhegðun loðnunnar.

Aðferðir

Reiknilíkan fyrir gönguhegðun

Við lítum á eindalíkan sem ákvarðar hreyf-

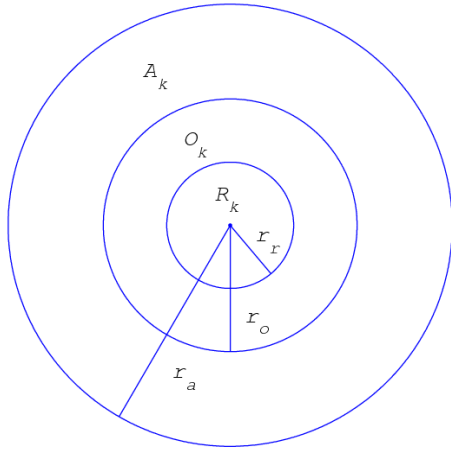
ingu einda út frá nokkrum samskiptareglum og tekur áhrif umhverfis einnig inn í reikninginn. Í gegnum þessar samskiptareglur getur mikill fjöldi einda skynjað umhverfi sitt á áhrifaríkan hátt þar sem upplýsingar um umhverfið breiðast út í hópi eindanna.

Við fetum í fótspor Aoki (1982) og Huth & Wissel (1992) þar sem hver eind hefur þrjú s.k. skynsvæði sem hún lítur til, séu aðrar eindir innan svæðanna. Svæðin má sjá á 1. mynd og eru eftirfarandi: Innsta svæðið er *fráhrindisvæði*, og sé önnur eind innan þess svæðis leitar eindin beint í áttina frá slíkri eind. Þannig forðast eindin að rekast á aðrar eindir. Ysta svæðið er *aðdráttarsvæði*, og reynir eindin að nálgast eindir innan þess sem gerir að verkum að eindir dreifast ekki út um allar trissur. Hringkraginn þar á milli nefnist *aðlögunarsvæði*, og leitast eind við að laga bæði hraða sinn og stefnu að þeim eindum sem eru innan þess svæðis. Ofangreindar upplýsingar þarf að greina og meta saman, og því tekur eindin vegið meðaltal þeirra, sjá jöfnu (3).

Við táknum mengi auðkennisnúmera þeirra einda sem eru innan fráhrindisvæðis eindar k á tíma t með $R_k(t)$, innan aðlögunarsvæðisins með $O_k(t)$ og innan aðdráttarsvæðisins með $A_k(t)$. Enn fremur látum við $k \in O_k(t)$ fyrir öll t . Þannig tryggjum við að eind tekur sína eigin stefnu inn í reikningana. Til þess að einfalda skriftir sleppum við að skrifa (t) þegar við vísum í svæðin í jöfnu (3). Við látum I_k tákna sammengi þessara þriggja mengja og $|\cdot|$ tákna fjölda einda innan viðkomandi svæðis.

Ólíkt svipuðum líkönum, (Aoki 1982, Huth & Wissel 1992, Couzin o.fl. 2002, Kunz & Hemelrijk 2003, Hemelrijk & Kunz 2005, Kunz o.fl. 2006, Hemelrijk & Hildenbrandt 2008, Viscido o.fl. 2004, 2005), er s.k. *blindsvæði* fyrir aftan hverja eind ekki til staðar. Deila má um gildi slíks svæðis þegar kemur að fiskum eins og loðnu, þar sem hliðarrák (e. *lateral line*) gerir fiskinum kleift að skynja fiska fyrir aftan sig. Að auki virðist slíkt svæði ekki hafa teljandi áhrif á keyrslur svipaðra líkana (Huth & Wissel 1994).

Við látum nú $\phi_k(t)$ vera stefnuhorn eindar k á tíma t . Á hverju tímaskrefi ákvarðar eind næstu stefnu sína út frá núverandi stefnu og staðsetningu granneinda sinna. Einnig kemur hitastig inn í reikningana sem lýst er síðar í jöfnum (2) og (4). Stefnum granneinda þarf að veita og meta og er $\phi_k(t + \Delta t)$ uppfært sem



1. mynd. Skynsvæði eindar k . A_k er mengi auðkennisnúmers einda innan aðdráttarsvæðis, O_k er mengi númers einda innan aðlögunarsvæðis og R_k mengi númers einda innan fráhrindisvæðis. Svæðin hafa geisla r_a , r_o og r_r .

Figure 1. Zones of interaction (sensory zones) of particle k . A_k , O_k , and R_k denote the sets of indices of the particles within the zone of attraction, orientation, and repulsion, respectively. These zones have radii r_a , r_o , and r_r , respectively.

$$\begin{pmatrix} \cos(\phi_k(t + \Delta t)) \\ \sin(\phi_k(t + \Delta t)) \end{pmatrix} = \frac{\mathbf{D}_k(t + \Delta t)}{\|\mathbf{D}_k(t + \Delta t)\|} \quad (1)$$

þar sem \mathbf{D}_k er vigur sem gefur stefnu eindar k . Við látum $\mathbf{q}_k(t) = (x_k(t), y_k(t))^T$ tákna staðsetningu eindar k á tíma t . Stefnuvigurinn er vegið meðaltal áhrifa granneindanna og áhrifa umhverfisins:

$$\mathbf{D}_k(t + \Delta t) := \left((1 - \beta) \frac{\mathbf{d}_k(t + \Delta t)}{\|\mathbf{d}_k(t + \Delta t)\|} + \beta \frac{\nabla r(T(\mathbf{q}_k(t)))}{\|\nabla r(T(\mathbf{q}_k(t)))\|} \right) \quad (2)$$

þar sem $0 \leq \beta \leq 1$. Vigurinn \mathbf{d}_k tákna áhrif granneinda og tekur mið af ofangreindum áhrifasvæðum á eftirfarandi hátt: 1

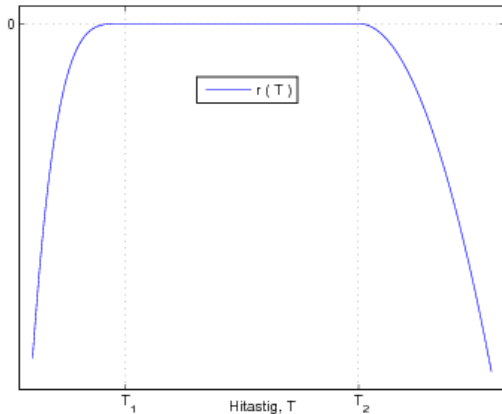
$$\mathbf{d}_k(t + \Delta t) := \frac{1}{|I_k|} \left(\sum_{r \in R_k} \frac{\mathbf{q}_k(t) - \mathbf{q}_r(t)}{\|\mathbf{q}_k(t) - \mathbf{q}_r(t)\|} + \sum_{o \in O_k} \begin{pmatrix} \cos(\phi_o(t)) \\ \sin(\phi_o(t)) \end{pmatrix} + \sum_{a \in A_k} \frac{\mathbf{q}_a(t) - \mathbf{q}_k(t)}{\|\mathbf{q}_a(t) - \mathbf{q}_k(t)\|} \right) \quad (3)$$

og við minnumst þess að ofangreind mengi R_k , O_k og A_k eiga við tíma t .

Seinni liðurinn í jöfnu (2) lýsir áhrifum hitastiguls. Það er gert á sama hátt og hjá Sven Sigurðsson o.fl. (2002), Hubbard o.fl. (2004), Kjartan G. Magnússon o.fl. (2004) og Kjartan G. Magnússon o.fl. (2005). Reiknaður er stigull tvívíðs falls r sem ákvarðast á hverjum stað út frá hitastigi sjávar, T , samkvæmt eftirfarandi jöfnu:

$$r(T) := \begin{cases} -(T - T_1)^4 & \text{ef } T \leq T_1 \\ 0 & \text{ef } T_1 \leq T \leq T_2 \\ -(T - T_2)^2 & \text{ef } T_2 \leq T \end{cases} \quad (4)$$

Hér eru T_1 , T_2 fastar og $[T_1, T_2]$ er svokallað *kjörhitastig* einda. Stigullinn er reiknaður á þeim stað sem eindin er stödd og kvarðaður þannig að hann verði að einingarvigri. Við nánari skoðun á stigli r sjáum við að eindir leita til svæða þar sem hitastigið er innan kjörhitastigs og er þessi tilhneiging



2. mynd. Fallið r frá jöfnu (4). Hitastigsbilið $[T_1; T_2]$ er kjörhitastig einda.

Figure 2. Graph of the temperature response function r from Equation (4). Here $[T_1; T_2]$ is the preferred temperature range.

sterkari á köldum stöðum. Graf fallsins r má sjá á 2. mynd. Hitastigsgögnum, sem notuð voru við þessar keyrslur, er nánar lýst í kafla 3.1.

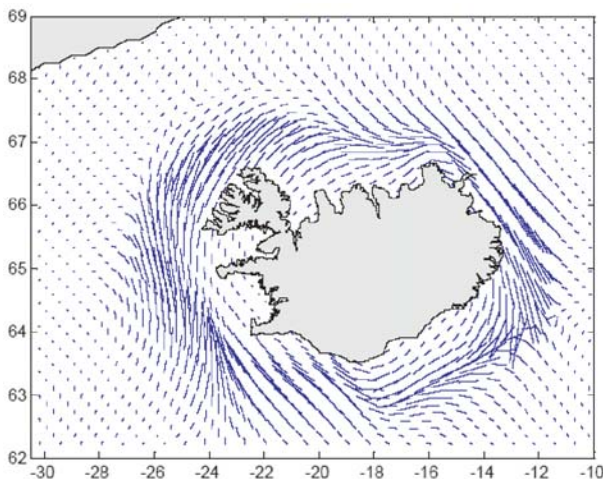
Hraða eindar k á tíma t táknum við $v_k(t)$ og er hann uppfærður á eftirfarandi hátt:

$$v_k(t + \Delta t) := \frac{1}{|O_k|} \sum_{j \in O_k} v_j(t) \quad (5)$$

Þegar jöfnur (1)-(5) eru teknar saman og auk þess tekið tillit til þess að fiskurinn berst líka með sjávarstráumum, líkt og gert er í eldri líkönum (Kjartan G. Magnússon o.fl. 2004, Kjartan G. Magnússon o.fl. 2004, Kjartan G. Magnússon o.fl. 2005), fæst loks líkanið sem lýsir því hvernig ein-dir uppfæra staðsetningu sína:

$$q_k(t + \Delta t) = q_k(t) + \Delta t \left(v_k(t + \Delta t) \frac{D_k(t + \Delta t)}{\|D_k(t + \Delta t)\|} + C(q_k(t)) \right) \quad (6)$$

Hér er C hraðavigur sjávarstraumsins. Við notumst við sama straumakort og Kjartan G. Magnússon o.fl. (2005), sem sjá má á 3. mynd og verður nánar lýst í kafla 3.1. Hraði sjávarstrauma er af sömu



3. mynd. Straumsvið í kringum Ísland sem notað er í keyrslunum. Styrk straumsins má sjá út frá lengd (bláu) strikanna. Sterki straumurinn gengur réttsælis um Ísland.

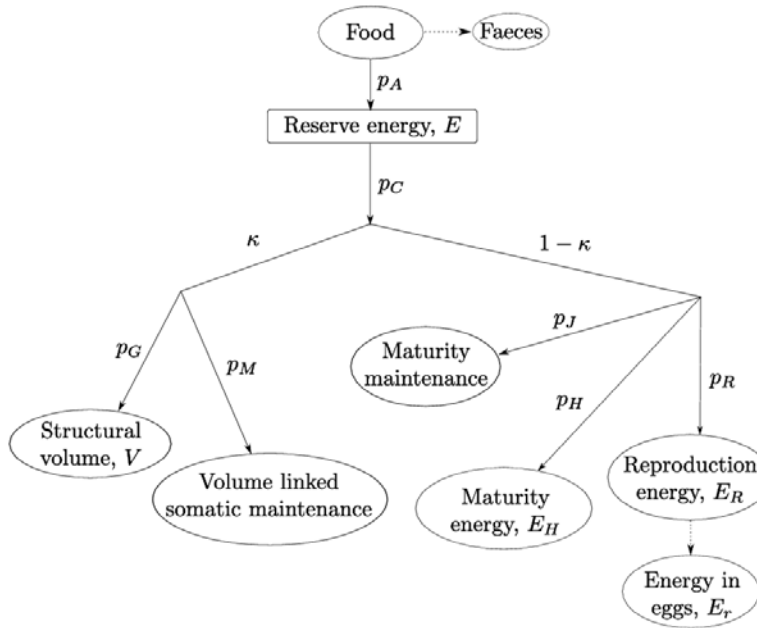
Figure 3. Simulated ocean current field around Iceland. The strength of the current is given by the length of the (blue) line segments. The strong current runs clockwise around Iceland.

stærðargráðu og sundhraði loðnunnar og því mikilvægt að taka tillit til hans.

Reiknilíkan fyrir vöxt og kynþroska

Reiknilíkanið fyrir vöxt og kynþroska loðnu er byggt á aðferðafræði sem kennd er við kvikan orkubúskap (e. Dynamic Energy Budget). Aðferðafræðin er ættuð úr vistfræði og lýsir upptöku kolefnis úr fæðu og umbreytingu þess í líkamsbyggingu, innri orkuforða og orku til æxlunar hvers einstaklings. Góða greinargerð fyrir aðferðafræðinni má finna í Nisbet o.fl. (2000), Kooijman (2001), Kooijman o.fl. (2008) sem og í bókum Kooijman (2010), Gurney & Nisbet (1998). Á 4. mynd sést orkuflæði innan einstaklings samkvæmt kvika orkubúskapnum. Eftir-farandi niðurstöður voru birtar í Baldvin Einarsson o.fl. (2011).

Haldið er utan um fjórar ástandsþreytur hvers einstaklings: lengd lífmassa, L , innri orku, E , orku kynkirtla, E_H , og orku tiltæka fyrir



4.. mynd. Orkuflæði og κ -reglan svo kallaða. Gert er ráð fyrir að hlutfall orku sem flæðir í vöxt og viðhald sé κ og afgangurinn fari í æxlun. Byggt á myndum Kooijman o.fl. (2008) og Pecquerie o.fl. (2009).

Figure 4. Energy flow and the κ -rule. The fraction of energy, which is used for growth and maintenance, is assumed to be κ , and the rest is utilized for reproduction. Based on figures in Kooijman o.fl. (2008) and Pecquerie o.fl. (2009).

eggjamyndun, E_R . Við gerum nú stuttlega grein fyrir þeim afleiðujöfnum sem lýsa því hvernig jöfnurnar, sem eru fengnar frá Nisbet o.fl. (2000), Kooijman o.fl. (20089), Pecquerie o.fl. (2009), breytast með tíma. Að auki innleiðum við nýja ástandsbreytu E_r sem við látum tákna þá orku sem hver fiskur hefur flutt til hroga. Þannig mun E_r lýsa hrogaþroskanum.

Grunnforsenda við útleiðslu þessara jafna er svonefnd κ -regla en samkvæmt henni helst fast hlutfall $\kappa / (1 - \kappa)$ milli orkuflæðis sem fer í vöxt og viðhald annars vegar og þess sem fer í vöxt og viðhald kynkirtla og framleiðslu eggja og svilja hins vegar.

Við veljum þá leið að gera ástandsbreytur einingaóháðar (e. *non-dimensionalized*) líkt og Hendrata & Björn Birnir (2010), þ.e. hér svarar einingarlaus stærðin l til lengdar, e til innri orku, u_H til orku kynkirtla, og u_R til tiltækrar hrogaorku. Eftirfarandi jöfnur eru leiddar út frá Kooijman o.fl. (2008):

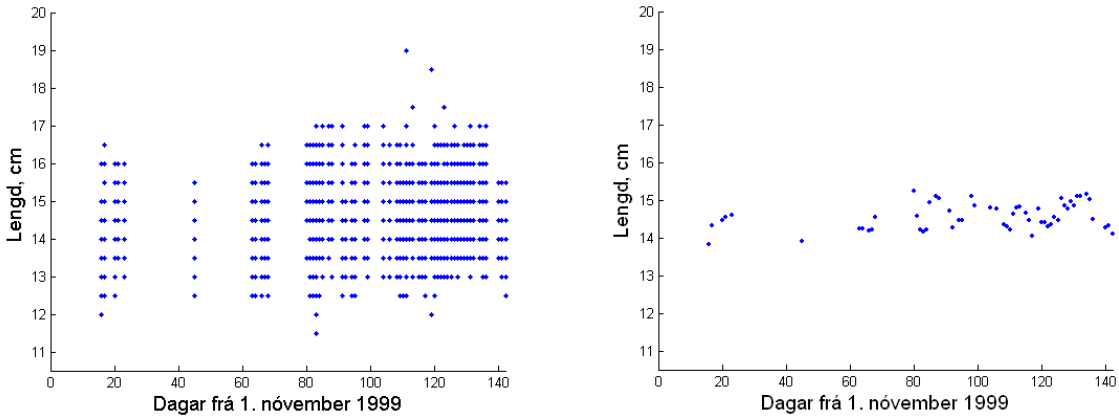
$$\frac{de}{dt} = \frac{v}{L_m l} (f - e) \quad (7)$$

$$\frac{dl}{dt} = \begin{cases} \frac{v}{3L_m} \left(\frac{e-l}{e+g} \right) & \text{ef } l < e \\ 0 & \text{annars} \end{cases} \quad (8)$$

$$\frac{du_H}{dt} = \begin{cases} \frac{v}{L_m} (1-\kappa) e l^2 \left(\frac{l+g}{e+g} \right) - k_J u_H & \text{ef } u_H < u_H^p \\ 0 & \text{annars} \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{du_R}{dt} = \begin{cases} \frac{v}{L_m} (1-\kappa) e l^2 \left(\frac{l+g}{e+g} \right) - k_J u_H^p & \text{ef } u_H \geq u_H^p \\ 0 & \text{annars} \end{cases} \quad (10)$$

Stikinn L_m lýsir hámarkslengd lífmassa. Fallið f í (7) lýsir fæðuframboði og því að hvaða marki einstaklingur getur nýtt sér þessa fæðu til orkuframleiðslu. Stikarnir v og g eru í raun samsettir af nokkrum stikum eins og lýst er í Nisbet o.fl. (2000). Stikinn g lýsir orkukostnaði við vöxt en stikinn v hefur verið kallaður *orkuleiðni*. Við athugum að stikarnir v og k_J lýsa hraða efnahvarfa og eru því



5. mynd. (a) Lengd 3 ára kynþroska hrygna, vertíðina 1999-2000. Gögn frá Hafrannsóknastofnuninni. (b) Meðaltal dag hvern.
Figure 5. (a) Length of 3 year old female capelin during the 1999-2000 season. (b) Average from each day.

háðir hitastigi samkvæmt eftirfarandi varmafræðilegu lögmáli:

$$p(T) = p(T_r) \exp\left(\frac{T_A}{T_r} - \frac{T_A}{T}\right) \quad (11)$$

þar sem p er hraði viðkomandi efnaskipta. Fastinn T_A er s.k. *Arrhenius hitastig* (K), sem er háð dýrategundum, en T_r (K) er svonefnt viðmiðunarhitastig. Stíkin T er hér hitastig umhverfisins, þ.e. sjávar.

Hinn kviki orkubúskapur lýsir því ekki beint hvernig hrogn þroskast heldur aðeins því hve mikla orku hver einstaklingur hefur tekið frá fyrir hrognaframleiðslu. Í tilviki loðnu er þessi orkuforði að mestum hluta fita. Ef við látum einingaróháðu stærðina e_r svara til þeirrar orku sem flutt hefur verið til hrognasetjum við fram eftirfarandi jöfnu:

$$\frac{de_r}{dt} = \gamma(u_R - e_r)e_r \quad (12)$$

til að lýsa því hvernig hún breytist með tíma. Þetta byggist á þeirri forsendu að hrognavöxtur sé í réttu hlutfalli við það magn hrognasetjum sem fyrir er, en að vaxtarhraðinn sé jafnframt í réttu hlutfalli við tiltæka orku sem enn hefur ekki verið nýtt til hrognamyndunar. Stíkin γ , sem einnig er hitastigsháður samkvæmt jöfnu (11), er fundinn með prófunum.

Í þessari grein er einungis verið að herma síðasta hluta æviskeiðs loðnu, og því hefur hver einstaklingur náð fullri lengd sinni sem og þroska kynkirtla. Kynkirtlar teljast þroskaðir þegar orka þeirra hefur náð ákveðnu marki sem er táknað u_H^p . Við setjum þó fram allar jöfnurnar þar sem þær koma allar við sögu sé allt lífsskeið loðnunnar hermt. Á 5. mynd b sést að mæld meðallengd loðnu breytist lítið sem ekkert á meðan hrygningargöngu stendur, og því verður jafna (8) óvirk sem svarar til þess að $l \geq e$. Þar sem gert er ráð fyrir að orka kynkirtla sé komin í hámark, þ.e. að þeir séu fullþroskaðir, er jafna (9) ekki heldur virk á þessu stigi. Í raun eru því aðeins jöfnur (7), (10) og (12) virkar. Einnig er vert að athuga að ekki er tekið tillit til þeirrar orku sem sund krefst. Slíkt gæti hugsanleg verið hluti af orkunni sem einstaklingur notar til vaxtar og viðhalds og væri þá háð sundhraða en það er ekki gert í þessari grein.

Við athugum að hinn kviki orkubúskapur lýsir ekki þyngd einstaklings heldur lífmassa auk orkubúskaps. Aftur á móti eru mælistærðir oftast þyngd fisks, lengd hans og þyngd hrognasetjum. Mæld þyngd inniheldur að auki oftast vatn sem ekki hefur alltaf verið ástæða til að mæla. Hinar mældu stærðir fást þó með óbeinum hætti út frá kvika orkubúskapnum. Þyngd fisks fæst með eftirfarandi jöfnu:

$$W = d_v L^3 + \frac{E + E_R - E_r}{\rho_E} + \frac{E_r}{\rho_r} \quad (13)$$

þar sem d_V (g cm^{-3}), ρ_E (J g^{-1}) og ρ_r (J g^{-1}) eru stíkar sem lýsa umbreytingu breytna kvika orku-búskapsins yfir í mælanlegar stærðir og L er lengd lífmassa. Gildum stíkana er lýst í kafla 3.2 sem og hvernig leiðrétt er fyrir hækkandi vatnsinnihaldi hrognna. Enn fremur látum við fituinnihald einstaklings ákvarðast af:

$$W_{\text{fita}} = \frac{E + E_R - E_r}{\rho_E} \quad (14)$$

og þyngd hrognanna af:

$$W_{\text{hrogn}} = \frac{E_r}{\rho_r} \quad (15)$$

Sambandið milli einingarháðu stærðanna og þeirra sem koma fram í jöfnum (13), (14) og (15) er eftirfarandi:

$$E = [E_m] L_m^3 l^3 e \quad (16)$$

$$E_H = [E_m] L_m^3 u_H \quad (17)$$

$$E_R = [E_m] L_m^3 u_R \quad (18)$$

$$L = L_m l \quad (19)$$

$$E_r = [E_m] L_m^3 e_r \quad (20)$$

Hér er $[E_m]$ hámarksorkupéttleiki sem meta þarf út frá mælingum.

Gögn og niðurstöður

Hermanir af göngumynstri þriggja vertíða

Líkaninu sem lýst er að ofan er ætlað að herma göngu loðnu. Eðli málsins samkvæmt er slík hegðun afar flókin. Líkanið er háð hliðstæðum skorðum og aðrar tilraunir til þess að lýsa hegðun lifandi vera á stærðfræðilegan hátt. Þegar öllu er á botninn hvolft er ógjörningur að vita með vissu hvernig dýr hugsa og bregðast við umhverfi sínu og hvaða skýringar eru á ákveðinni hegðun. Ávallt þarf að gera nálganir og kanna hvort líkaninu beri saman við það sem unnt er að mæla og athuga. Líkanið er takmarkað að því leyti að það lýsir ekki frjálsum huga heldur er bundið við fyrir fram ákvarðaðar reglur. En þótt vel takist til er ógerlegt að úrskurða um hvort í raun sé um að ræða rétta lýsingu á hugsunarhætti og viðbrögðum lífveranna.

Talsvert af gögnum er til staðar en gera verður nokkrar nálganir þar sem þær eiga við. Loðna er uppsjávarfiskur sem heldur sig að mestu leyti á 0–400 metra dýpi (Hjálmar Vilhjálmsson 1994). Ákjósanlegast væri að nota þrívítt líkan sem tæki mið af þessu. Hér er þó notast við tvívítt líkan og miðað við 50 metra dýpi. Þannig fæst umtalsverð reikningsleg hagkvæmni bæði hvað varðar minnisþörf sem og tíma keyrslna.

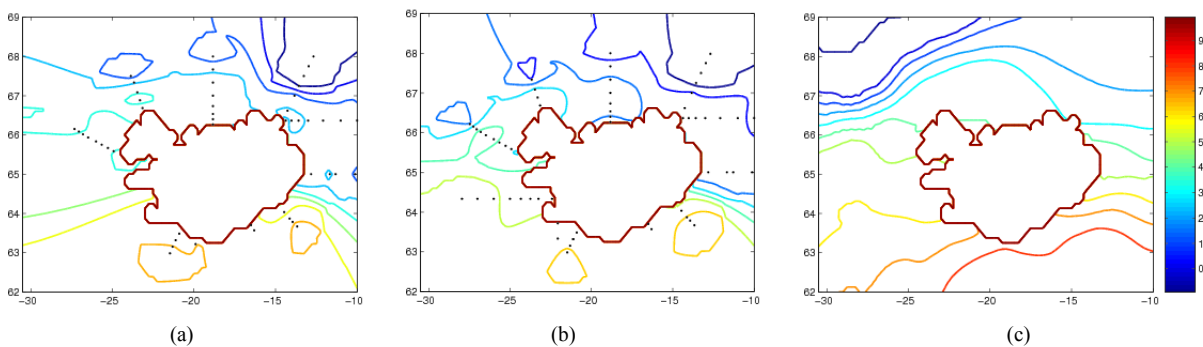
Það forrit, sem nú er notast við, var hannað af Aletheu Barbaro ásamt fleirum sem hluti af doktorsverkefni hennar. Það er byggt á svipuðum grunni og þau forrit sem Kjartan G. Magnússon o.fl. (2004, 2005) lýsir. Reiknirit fyrir útreikningum á staðsetningu N einda sem þurfa að hafa samskipti sín á milli krefst útreikninga sem aukast í versta falli eins og N^2 . Samkvæmt því vex reiknitími hratt með fjölgun einda. Við þessu má bregðast með því að skipta hafsvæðinu niður í litla búta (Kjartan G. Magnússon o.fl. 2004). Hér er hins vegar farin sú leið að skipta því í nokkru stærri hlutsvæði, sem eru höfð þannig að þau falli vel að samhliða reikningum og ræður forritið við mun meiri fjölda einda en áður hefur tíðkast. Nánari lýsingar á forritunaraðferðum og greiningu á virkni forritsins má finna í

Youseff o.fl. (2008).

Sem fyrr segir er notast við sömu strauma og Kjartan G. Magnússon o.fl. (2005), sem sjá má á 3. mynd. Gerð er sú nálgun að hafa strauminn hinn sama yfir öll árin, þrátt fyrir árstíðabundnar sveiflur og jafnvel dagssveiflur sökum veðurs og vinda. Mesta færsla einda af völdum strauma er 15 km/dag. Gert er ráð fyrir að eindirnar breyti ekki stefnu sinni af völdum straumanna og því hliðrar hann eindunum óháð þeirra eigin stefnu. Slík nálgun ætti að teljast skynsamleg þar sem loðnan er þekkt fyrir að synda hvort sem er með eða á móti straumi.

Svæðið sem eindirnar ferðast um svarar til hafsvæðisins frá 10,0–30,5 gráðum vestur og 62,0–69,0 gráðum norður. Árin 1984–1985 og 1990–1991 er notast við hitamæligögn frá Hafrannsóknastofnuninni í febrúar á 50 metra dýpi, sjá 6. mynd a og b. Hins vegar voru samsvarandi gögn ekki fyrir hendi í janúar 2008 þegar að því kom að spá fyrir um hrygningargöngu loðnunnar. Var því notast við yfirborðsgögn frá þýskri veðurstofu þann 5. febrúar 2008 (Wetterzentrale 2008). Hitastig var í öllum tilfellum brúað í forritinu *Ocean Data View* (Schlitzer 2010).

Eðli hitastigsgagnanna árið 2008 er frábrugðið mæligögnum frá Hafrannsóknastofnuninni. Þýska veðurstofan tekur meðaltal af ýmsum yfirborðsgögnum frá t.d. baujum, gervihnöttum og skipum. Vanti gögn er notast við meðaltal sama mánaðar frá árunum 1961 til 1990. Talið var að ekki skipti miklu máli að styðjast við yfirborðsgögn í stað gagna af 50 metra dýpi, þar sem sterkir vindar og stormviðri valda mikilli blöndun í efstu lögum sjávar niður á nokkurra tuga metra dýpi á þessum árstíma. Mæligögn styðja þessa nálgun og ættu því keyrslurnar að vera samanburðarhæfar milli ára. Jafnhitalínur fyrir árið 2008 eru á 6. mynd c.



6. mynd. Jafnhitalínur af brúuðum hitastigsgögnum sem notast var við í keyrslunum. Punktar í (a) og (b) sýna hvar mælingar fóru fram. Gögn frá febrúar (a) 1985, 50 m dýpi, (b) 1991, 50 m dýpi, (c) 2008, yfirborðshiti.

Figure 6. Contour lines of interpolated temperature data used in the simulations. The dots in (a) and (b) show locations of measurement points. Data from February of (a) 1985, 50 m depth, (b) 1991, 50 m depth, and (c) 2008, surface temperature.

Með þeim stikagildum sem sýnd eru í töflu 1 og nánar er lýst í Barbaro o.fl. (2009) fæst góð mynd af þremur hrygningargögnum. Athugum að þar sem $r_a = r_o$ er í raun ekkert aðdráttarsvæði. Upphafsstefna er handahófskennd og ferðin jafndreifð á bilinu [0, 4.5] km/dag. Þegar eindirnar komast austur fyrir 13,5 °V er ferðin uppfærð í 15 km/dag. Fjöldi einda í þessum keyrslum er um $5 \cdot 10^4$, þannig að fjöldi fiska sem svarar til hvernar eindar er af stærðargráðunni 10^6 . Í Barbaro o.fl. (2009) eru færð rök að því að geisli áhrifasvæðis skalist með kvaðratrót af þessu gildi þ.a. 1.2 km geisli eindar ætti samkvæmt því að svara til 1,2 m fyrir stakan fisk. Við veitum því athygli að í Barbaro o.fl. (2009) er rætt um næmni líkansins fyrir gildi á β en þá umræðu þarf að miða við gildi $\Delta t \beta$. Hið rétta er að uppfæra stefnugild eindar eins og í jöfnu (2) að ofan. Einungis vantaði Δt í jöfnuna í Barbaro o.fl. (2009) en þar sem tímaskrefinu var ekki breytt í umræddri grein hefur þessi smávægilega villa ekki áhrif á niðurstöðurnar.

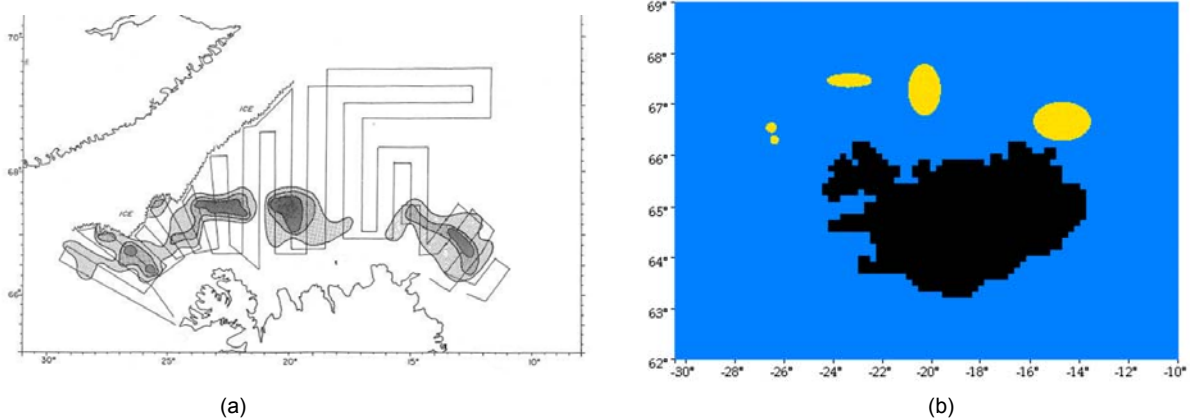
Fyrsta keyrslan er um veturinn 1984–1985. Keyrslan tekur 2200 tímaskref sem samsvarar 110 dögum. Myndir 7–9 sýna bergmálmælingar frá Hjálmarí Vilhjálmssyni (1994) ásamt myndum úr keyrslunni sem svara gróflega til sama tíma. Á 7. mynd má sjá bergmálmælingar frá 1. til 21. nóvember 1984 ásamt upphafsdræifingu einda í keyrslunni. Upphafsdreifingin var ákvörðuð út frá þeim svæðum þar sem þéttleiki loðnu virtist mestur. Keyrslan frá 1984–1985 hefst um miðjan nóvember.

Tafla 1. Gildi geisla áhrifasvæða og annarra stika í keyrslum göngulíkansins.

Table 1. Values of radii of sensory zones and other parameters in simulations of the migration model.

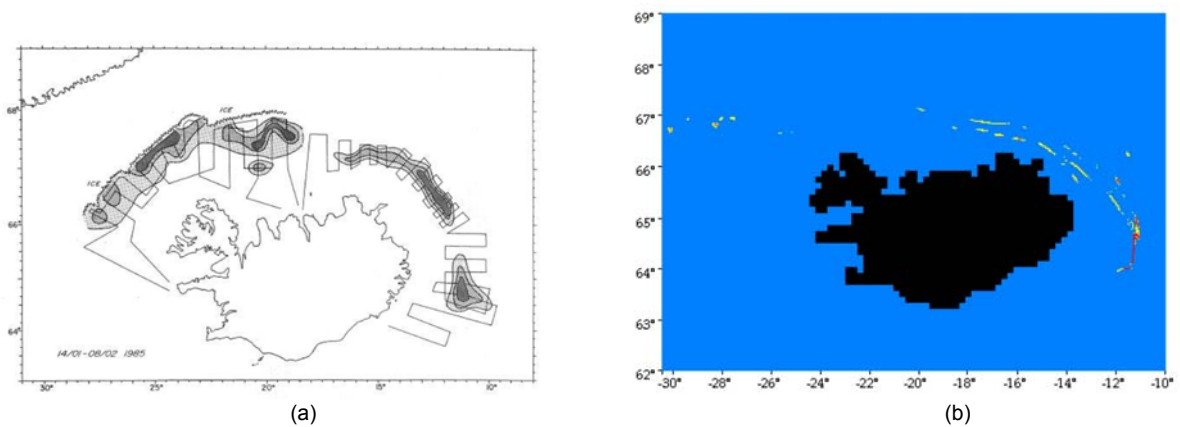
r_r	0.12	km	geisli fráhrindisvæðis
r_o	1.20	km	ytri geisli aðlögunarsvæðis
r_a	1.20	km	ytri geisli aðdráttarsvæðis
$[T_1, T_2]$	[3.0, 6.5]	°C	kjörhitastigsbil
β	0.01	-	vægishlutfall hitastigsáhrifa
Δt	0.05	d	tímaskrefslengd

Á 8. mynd a má sjá bergmálmælingar frá 14. janúar til 8. febrúar 1985, og 8. mynd b sýnir 65. dag keyrslunnar sem svarar til miðs janúars 1985. Á þeim myndum sést að aðaltröfn ferðast meðfram austurströndinni. Vert er að athuga að keyrslan nær fram háum þéttleika innan torfunnar til suðurs, eins og rauður litur sýnir. Í norðvestri á myndunum ber mælingum og keyrslu ekki vel saman en það gæti skýrst af loðnu sem kom undan ís. Í keyrslunni er ekki bætt við eindum og því gæti vantað að þann hluta sem mælingar fundu. Á 9. mynd a, eru bergmálmælingar frá 7. til 20. febrúar 1985, og 9. mynd b sýnir dag 109 í keyrslu sem svarar til seinni hluta febrúar. Báðar myndir sýna torfu sem rennir sér inn að landi úr austri. Við athugum að keyrslan sýnir ílanga torfu einda sem kemur að landi á svipaðri breiddargráðu og raunin var samkvæmt bergmálmælingum, þótt eindirnar séu ekki eins nálægt landi.



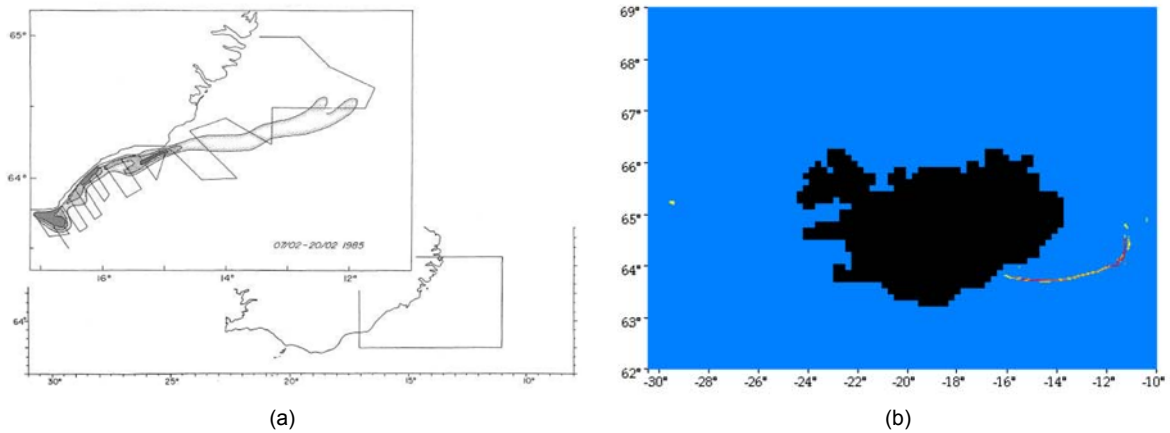
7. mynd. Dreifing loðnu í nóvember 1984. (a) Bergmálmælingar frá 1. til 21. nóvember (Hjálmar Vilhjálmsson 1994). (b) Upphafsdreifing keyrslunnar.

Figure 7. The distribution of capelin in November 1984. (a) Acoustic data from 1 to 21 November (from Hjálmar Vilhjálmsson 1994). (b) Initial distribution for the simulation.



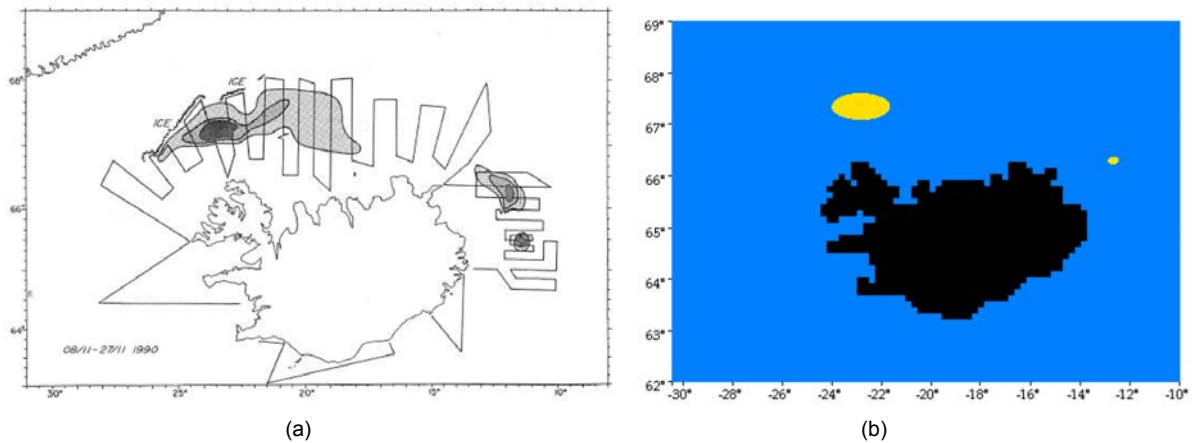
8. mynd. Drefing loðnu um miðjan janúar til upphafs febrúars 1985. (a) Bergmálmælingar frá 14. janúar til 8. febrúar (Hjálmar Vilhjálmsson 1994). (b) Dreifing einda á degi 65 í keyrslu sem svarar til miðs janúar.

Figure 8. The distribution of capelin from mid-January to early February of 1985. (a) Acoustic data from 14 January to 8 February (from Hjálmar Vilhjálmsson 1994). (b) Simulated distribution in mid-January, day 65 of the simulation.



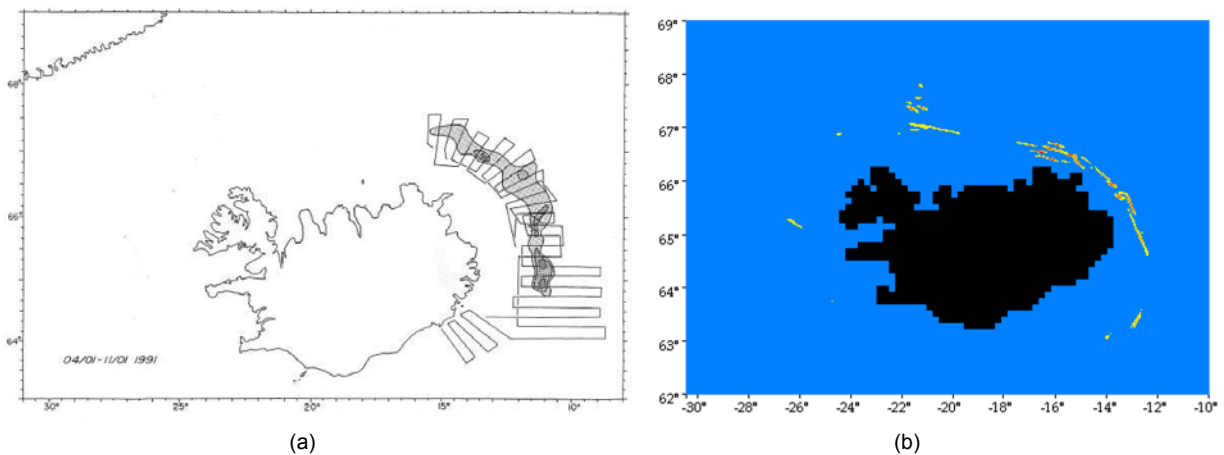
9. mynd. (a) Nærmynd af dreifingu loðnu frá 7. til 20. febrúar 1985 (Hjálmar Vilhjálmsson 1994). (b) Hermd dreifing í lok febrúar, á degi 109 í keyrslu.

Figure 9. (a) Close up of the distribution of capelin from 7 to 20 February 1985 (from Hjálmar Vilhjálmsson 1994). (b) Simulated distribution in late February, day 109.



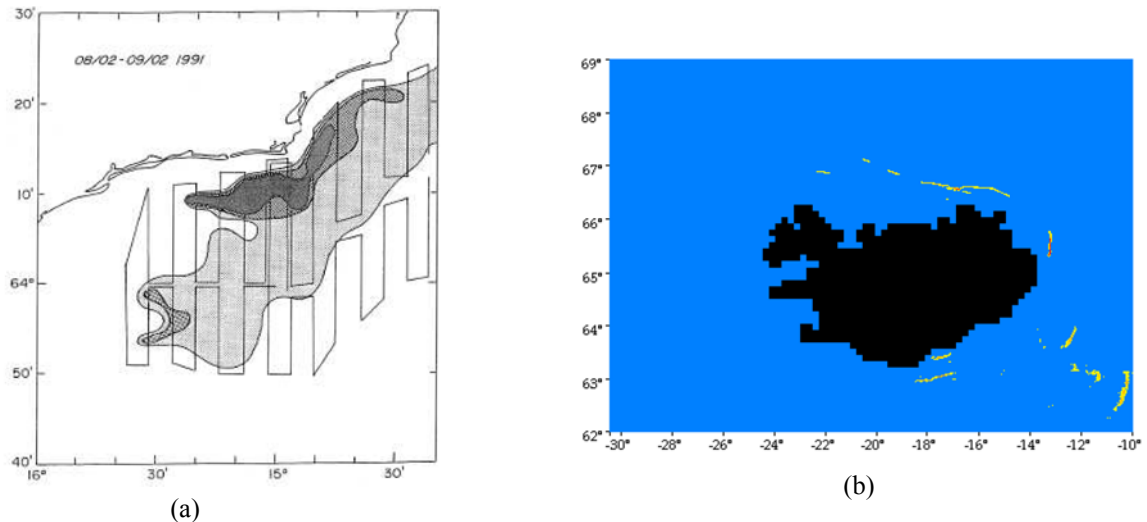
10. mynd. Dreifing loðnu í nóvember 1990. (a) Bergmálmælingar frá 8. til 27. nóvember (Hjálmar Vilhjálmsson 1994). (b) Upphafsdreifing einda í keyrslu.

Figure 10. The distribution of capelin in November 1990. (a) Acoustic data from November 8 to November 27 (from Hjálmar Vilhjálmsson 1994). (b) Initial distribution for the simulation.



11. mynd. Dreifing loðnu í janúar 1991. (a) Bergmálmælingar frá 4. til 11. janúar (Hjálmar Vilhjálmsson 1994). (b) Hermd dreifing á 44. degi keyrslunnar sem svarar til upphafs janúar.

Figure 11. The distribution of capelin in January 1991. (a) Acoustic data from 4 to 11 January (from Hjálmar Vilhjálmsson 1994). (b) Simulated distribution in early January, day 44 of the simulation.

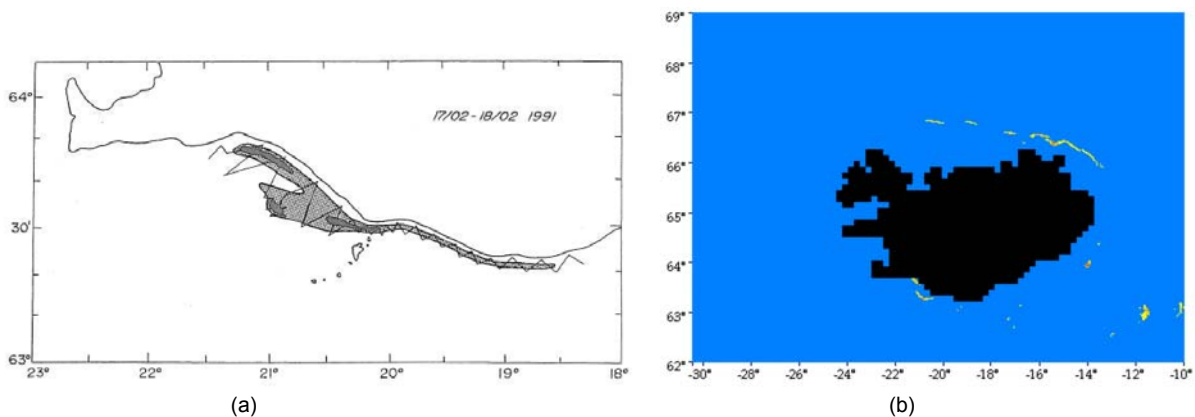


12. mynd. (a) Nærmynd af dreifingu loðnu suðaustur af Íslandi frá 8. til 9. febrúar 1991 (Hjálmar Vilhjálmsson 1994). (b) Hermd dreifing á degi 66 sem svarar til upphafs febrúar 1991.

Figure 12. (a) Close up of the distribution of capelin southeast of Iceland from 8 to 9 February 1991 (from Hjálmar Vilhjálmsson 1994). (b) Simulated distribution in early February, day 66.

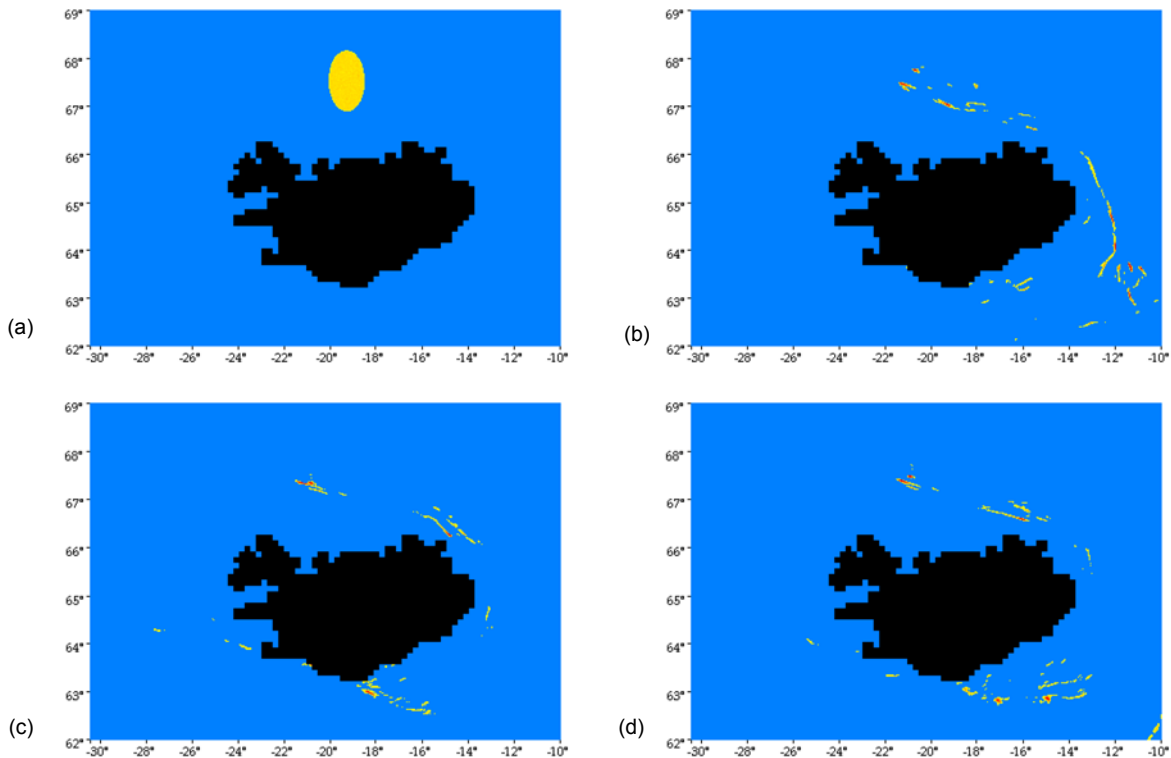
Með sömu stikum og í keyrslunni fyrir 1984-1985 herfum við síðan hrygningargöngu loðnunnar frá 1990-1991. Keyrslan gengur í 1900 tímaskref sem svarar til 95 daga. Upphafsdreifing er fengin út frá dreifingu loðnu frá 8. til 27. nóvember 1990 (Hjálmar Vilhjálmsson 1994). Á 10. mynd eru bergmálmælingar ásamt upphafsdreifingu í keyrslunni. Á 11. mynd a má sjá bergmálmælingar frá 4. til 11. janúar 1991, en 11. mynd b sýnir keyrsluna á 44. degi sem svarar til upphafs janúar. Á báðum myndum sést torfa sem ferðast réttislaus umhverfis Ísland. Staðsetning fremstu torfanna er svipuð í báðum tilvikum. Í keyrslunni er aftur á móti staðsetning þeirra sem reka lestina nær landi heldur en mælingar gera ráð fyrir. Línurnar á 11. mynd a sýna hvar rannsóknarskip leituðu að loðnu og er því erfitt að meta nákvæmni staðsetningar loðnu utan þess svæðis.

Á 12. mynd eru bergmálmælingar frá 8. til 9. febrúar 1991 ásamt degi 66 í keyrslunni sem svarar til upphafs febrúars. Keyrslan sýnir torfu einda leita að landi sem ber saman við mælingar. Hins vegar eru eindirnar í keyrslunni sunnar og vestar heldur en bergmálmælingar sýndu. Á 12. mynd b er einn-ig mikill fjöldi einda í suðausturhorni svæðisins sem mælingar styðja ekki. Teljum við að þessi óvænta staðsetning stafi af því hvernig hitastigsgögnin voru brúuð eins og lýst er nánar í Barbaro o.fl. (2009). 13 mynd ber saman bergmálmælingar frá 17. til 18. febrúar 1991 og keyrslu frá miðjum febrúar á degi 72. Við sjáum að keyrslan sýna tvær torfur einda nálægt suðvesturströnd Íslands á nákvæmlega sama stað og bergmálmælingar sýna mesta þéttleika loðnu.



13. mynd. Dreifing loðnu suðvestur af Íslandi í febrúar 1991. (a) Bergmálmælingar frá 17. til 18. febrúar (Hjálmar Vilhjálmsson 1994). (b) Hermd dreifing á degi 72 sem svarar til miðs febrúar.

Figure 13. The distribution of capelin southwest of Iceland in February 1991. (a) Acoustic data from 17 to 18 February (from Hjálmar Vilhjálmsson 1994). (b) Simulated distribution in mid-February, day 72.

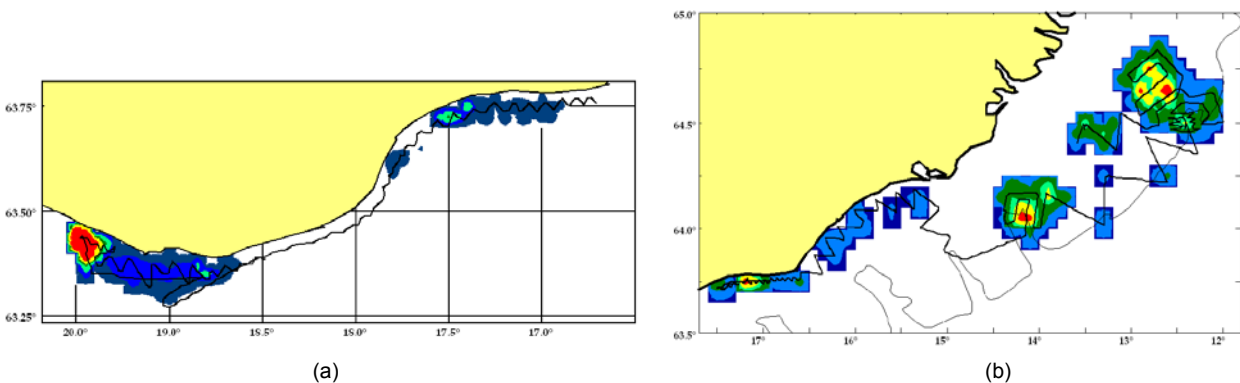


14. mynd. Hermanir af hrygningargöngu loðnu árið 2007-2008. (a) Byrjun janúar 2008, upphafsdreifing, (b) miður febrúar, dagur 47, (c) lok febrúar, dagur 59, (d) byrjun mars, dagur 65.

Figure 14. Simulation of the 2007-2008 spawning migration. (a) early January, day 0, (b) mid-February, day 47, (c) late February, day 59, (d) early March, day 65.

Ein áhugaverðasta niðurstaðan er vel heppnuð spá um gönguleið hrygningarstofnsins árið 2007-2008. Notast var við upphafsdreifingu sem fengin var frá rannsóknar- og fiskveiðiskipum í janúar 2008. Erfitt reyndist að finna loðnu það ár og var því tiltölulega litlum kvóta úthlutað. Veiðum var hætt í lok febrúar þar sem ekki tókst sem skyldi að mæla stofnstærðina sem virtist vera lítil. Þó skilnaði talsvert af loðnu sér í byrjun mars sem gerði það að verkum að frekari kvóti var ákvarðaður. Virtist loðnan hafa farið óhefðbundna leið að hrygningarslóðum.

Keyrslan svarar til 95 daga tímabils frá janúar til apríls. 14. mynd sýnir upphafsdreifingu keyrslunnar ásamt dreifingu á dögum 47, 59 og 65, sem svara gróflega til miðs febrúar, loka febrúar og byrjunar mars. 15. mynd a sýnir bergmálmælingar frá 26. og 27. febrúar, og 15. mynd b sýnir mælingar frá 29. febrúar til 3. mars. Þegar 14. mynd c og 15. mynd a eru bornar saman sést að meginhluti einda stefna að landi á mjög svipuðum slóðum og bergmálmælingar fundu loðnu seinna



15. mynd. Bergmálmæld dreifing loðnu í leiðöngrum Hafrannsóknastofnunarinnar. (a) Nálægt suðurströnd Íslands frá 26. til 27. febrúar 2008. (b) Nálægt suðausturströnd landsins frá 29. febrúar til 3. mars 2008.

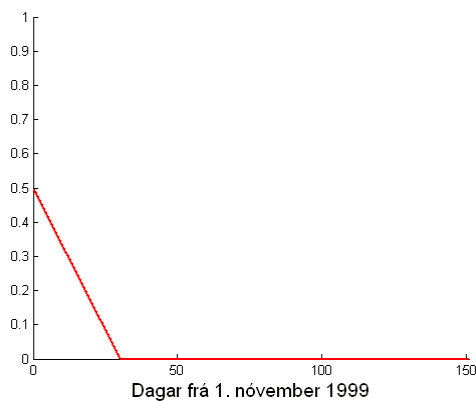
Figure 15. Measured distribution of capelin in expeditions of the Marine Research Institute (a) Near the south coast of Iceland from 26 to 27 February 2008. (b) Near the southeast coast of Iceland from 29 February to 3 March 2008.

meir. Enn fremur er eftirtektarvert að á 14. mynd d er torfa einda út af sunnarverðum Austfjörðum á næstum nákvæmlega sama stað og torfa fiska reyndist vera á samkvæmt 15. mynd b. Þetta gefur til kynna að leiðin sem eindirnar völdu sem og hlutfall þeirra sem gengu inn á landgrunnið í keyrslunni var merkilega nálægt mælingum. Eru þetta ekki síður áhugaverðar niðurstöður í ljósi þess að keyrslan var gerð í byrjun febrúar 2008, áður en bergmálsmælingar fóru fram.

Til þess að meta næmni líkansins fyrir breytingum á stikum þess, var hafsvæðinu skipt upp í 21 hólf, eins og lýst er nánar í Barbaro o.fl. (2009). Einum stika líkansins var breytt í einu og var fjöldi einda hafður svipaður í öllum keyrslunum. Á hverjum degi voru eindir hvers hólfis taldar og bornar saman við keyrslu göngunnar 2007–2008. Með þessu móti sýndum við fram á að tveir stikar skipta höfuðmáli fyrir göngumynstrið, kjörhitastigsbilið $[T_1, T_2]$ og β .

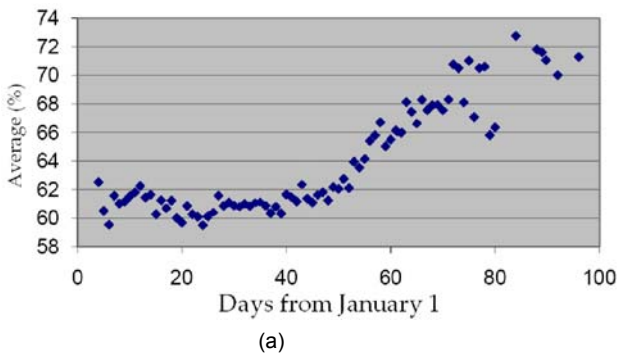
Áhuga vakti einnig hve næmt líkanið er fyrir gildi β . Gildið ákvarðar jafnvægi milli þess hvernig eindirnar skynja umhverfi sitt og hve mikið tillit þær taka til granneinda sinna. 6. mynd sýnir jafnhitalínur umhverfis Ísland. Þegar eindir berast með straumum austur fyrir land, rekast þær á efra mark kjörhitastigsbilsins. Gildi β þarf að vera nógu hátt til þess að eindirnar skynji higastigið en nógu lágt til þess að þær geti leitað inn á svæði utan kjörhitastigsbilsins. Með valinu $\beta = 0,01$ var eindum gert þetta kleift og syntu þær inn í hraðari straum sem bar þær að hrygningarslóðum, samanber 3. mynd. Athygli kann að vekja hversu lágt þetta gildi er. Hér verður að hafa í huga að áhrif kjörhitastigs koma einnig fram í aðlögun einda að stefnum granna sinna.

Niðurstaða þessara hermunatírauna er því sú að með því að taka einungis tillit til kjörhitastigs, sjávarstrauma og samskipta á milli einda má fá góða mynd af göngumynstri loðnunnar. Það undirstríkar sér í lagi þau áhrif sem breytingar á sjávarhitastigi geta haft á göngumynstrið.



16. mynd. Fæðuframboð, f , sem stuðst er við í kvika orkubúskapnum, sjá jöfnu (7).

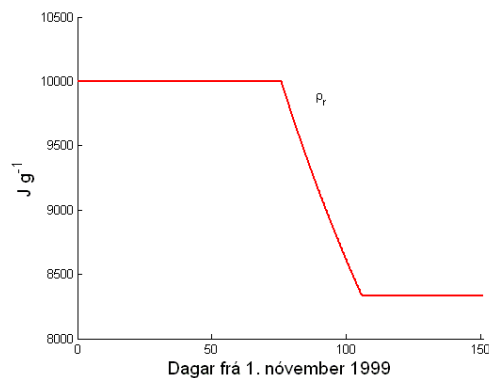
Figure 16. Food availability, f , used for the Dynamic Energy Budget, see Equation (7).



(a)

Hinn kviki orkubúskapur og vertíðin 1999–2000

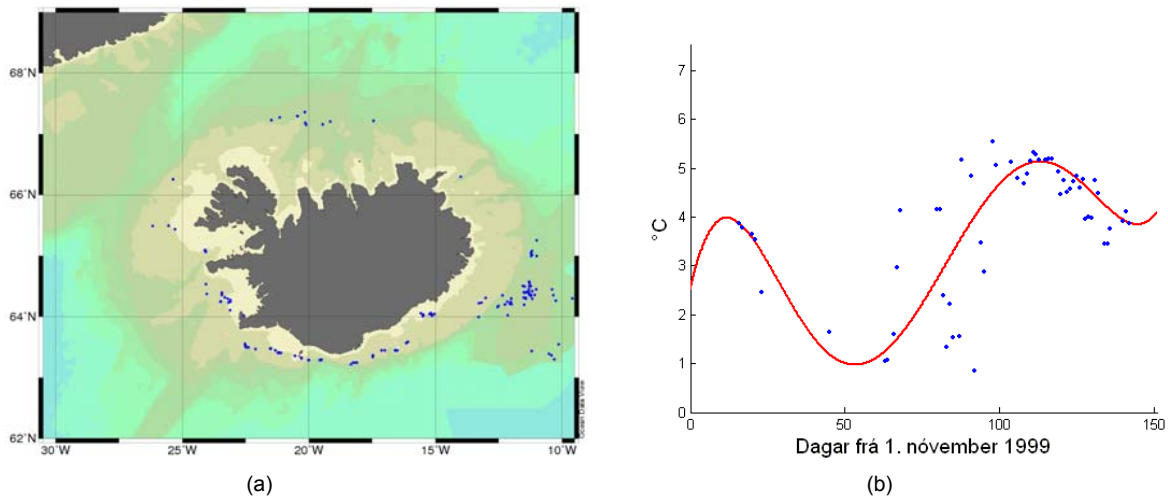
Við höfum notað gögn yfir þriggja ára kynþroska hrygnur frá vertíðinni 1999–2000 til að kanna hversu vel líkanið, sem byggir á kvikum orkubúskapi, nýtist til að lýsa því hvernig þroski loðnu, sér í lagi hrognafylling, breytist með tíma meðan á hrygningargöngu stendur. Eins og þegar hefur bent á eru það aðeins jöfnur (7), (10) og (12) sem eru virkar á þeim tíma. Samantekt á því hvaða gildi voru valin á þeim stikum, sem fyrir koma í þeim jöfnum, auk jafna (13)–(15), svo og hvernig þau voru ákvörðuð er að finna í töflu 2. Eru flest gildin



(b)

17. mynd. (a) Vatnsinnihald loðnuhrogna. Meðaltöl árána 1984–2009. Gögn frá Matís (Margeir Gissurarson o.fl. 2009). (b) Stikinn ρ_r , sem tekur tillit til vatnsinnihalds hrognanna. Samsvarar 20% vatnsaukningu á um einum mánuði.

Figure 17. (a) Water content of capelin roe. Averages from 1984–2009. Data from Matís (Margeir Gissurarson o.fl. 2009). (b) The parameter ρ_r , which takes into account the water content of roe. It assumes an increase of 20% in about one month.



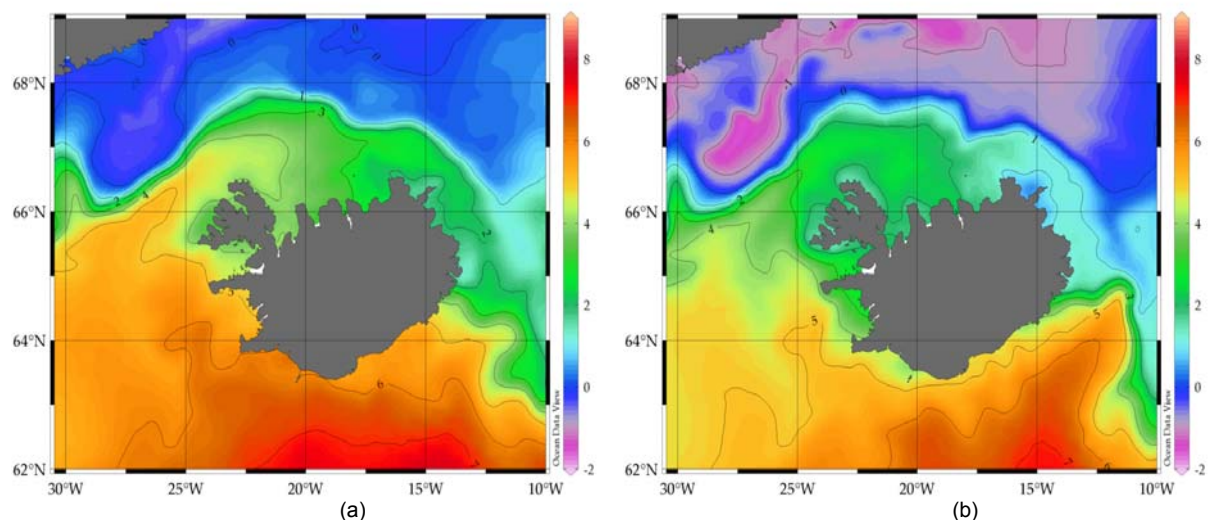
18. mynd. (a) Staðsetning mælinga á 3 ára hrygningarloðnu frá Hafrannsóknastofnuninni vertíðina 1999–2000. (b) Metið hitastig (bláir punktar) þar sem mælingar á loðnu fóru fram vertíðina 1999–2000 ásamt hitastigi sem notað var fyrir kvika orkubúskapinn (rauður ferill).

Figure 18. (a) Location of measurements of 3 year old spawning capelin from the Marine Research Institute the 1999–2000 season. (b) Estimated temperature (blue dots) from locations of measurements of capelin in 1999–2000 along with the temperature which was used for the DEB simulations (red curve).

svipuð og hjá Kooijman o.fl. (2008) og Pecquerie o.fl. (2009).

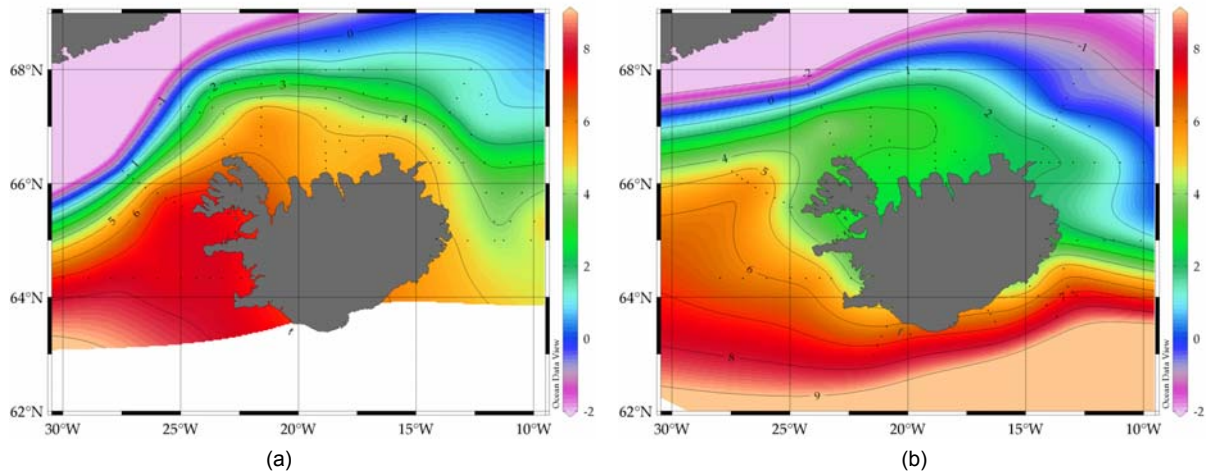
Matið á Arrheniusarhitastiginu í jöfnu (11) fékkst frá gögnum í Frank & Legget (1981), sem byggðust m.a. á gögnum frá Eyjólfri Friðgeirssyni (1976). Fékkst gildið $T_A = 9100$ K. Stikarnir v , γ og k_J eru háðir hitastigi samkvæmt jöfnu (11). Gildi í töflu 2 svara til viðmiðunarhitastigsins $T_r = 6,5^\circ\text{C}$. Jöfnurnar (7) (10) og (12) voru leystar tölulega yfir 150 daga tímabil með upphafstíma 1. nóvember 1999. Upphafsgildin á e , l , u_R og e_r voru valin 1,00, 0,83, 0,15 og 0,02. Í ljósi þess að fæðuframboð er lítið á þessu tímabili, var fæðufallið f í jöfnu (7) valið eins og sýnt er á 16. mynd. Gögn um fæðuframboð eru af skornum skammti og því kjósum við að velja f sem fremur einfalt fall.

Hitastig hefur áhrif á hraða efnaskipta og er því nauðsynlegt að hafa mat á hitastigi á gönguleið loðnu. Staðsetningar tiltækra mæligagna á loðnu sjást á 18. mynd a. Þessum mæligögnum fylgdu upplýsingar um staðsetningu en ekki hitastig. Almennar upplýsingar um mælt hitastig takmörkuðust við ákveðnar mælihlínur og tímasetningar. Því var valin sú leið að meta hitastigið, sem svarar til loðnumælinganna, út frá strauma- og hitastigslíkani sem Kai Logemann hefur þróað (Logemann & Harms 2006). Við metum hitastigið dag hvern, sem mælingar fóru fram, og tókum loks meðaltal dag



19. mynd. Sjávarhitastig á 45m dýpi frá líkani Dr. Kai Logemann. Gögn frá tímabilinu (a) 11. nóvember til 4. desember 1999, (b) 16. febrúar til 3. mars 2000.

Figure 19. Sea temperature at 45m depth from the model of Dr. Kai Logemann. Data from (a) November 11 to December 4 1999, (b) February 16 to March 3 2000.



20. mynd. Brúað mæligögn yfir sjávarhitastig á 50m dýpi frá Hafrannsóknastofnuninni. Staðsetningar mælinga eru sýndar sem svartir punktar. Gögn frá tímabilinu (a) 11. nóvember til 4. desember 1999. Neðri hlutinn er auður sökum skorts á mæligögnum. (b) 16. febrúar til 3. mars 2000.

Figure 20. Interpolated data on sea temperature at 50m depth from the Marine Research Institute. Measurement sites are shown as black dots. Data from (a) November 11 to December 4 1999. The lower part is white due to lack of data. (b) February 16 to March 3 2000.

hvern. Punktarnir (bláu) á 18. mynd b sýna þetta mat og á sömu mynd sýnir (rauður) ferill brúað hitastig sem var notað fyrir útreikninga á hinum kvika orkubúskapi. Við sýnum á 19. mynd hitastig samkvæmt líkanreikningum Kais á þeim dögum þar sem mælingar á hitastigi eru tiltækar, sjá 20. mynd. Engar mælingar er sunnan við land að hausti og því er neðri hluti 20. myndar a auður sem kemur ekki að sök þar sem loðna er ekki komin á þær slóðir á þessum tíma. Við veitum athygli að talsverður heitur sjór er fyrir norðan land í nóvember og desember. Með því að bera saman 19. og 20. mynd má sjá samsvörunina á milli líkaniðurstaðna Kai Logemanns og mæliniðurstaðna á þeim dögum sem mælingar fóru fram.

Út frá niðurstöðum þessara líkanreikninga ákvörðum við síðan breytingar á heildarþyngd, W ,

Tafla 2: Gildi stíka sem notaðir voru í jöfnum (7)-(15).

Table 2: Values of parameters used in Equations (7)-(15).

L_m	17.5 · 0.161	cm	Hámarks lengd lifmassa ¹
T_A	9100	K	Arrheniusarhitastig ¹
T_r	6.5 + 273.0	K	Viðmiðunarhitastig ²
ν	0.02	cm d ⁻¹	Orkuleiðni ³
g	1.20	-	Orkukostnaður við vöxt ³
γ	0.20	d ⁻¹	Vaxtarhraði hrogna ³
κ	0.4	-	Orkuflæðishlutfall til vaxtar og viðhalds ³
$k_j u_H^p$	3.1 · 10 ⁻⁵	d ⁻¹	Orkuflæði til viðhalds kynkirtla ²
d_V	1.0	g cm ⁻³	Þéttleiki lifmassa ⁴
ρ_E	39.3	kJ g ⁻¹	Orkuþéttleiki innri orku ⁵
ρ_r	10.0 - 8.3	kJ g ⁻¹	Orkuþéttleiki hrogna ³
$[E_m]$	5.75	kJ g ⁻¹	Hámarksorkuþéttleiki ²

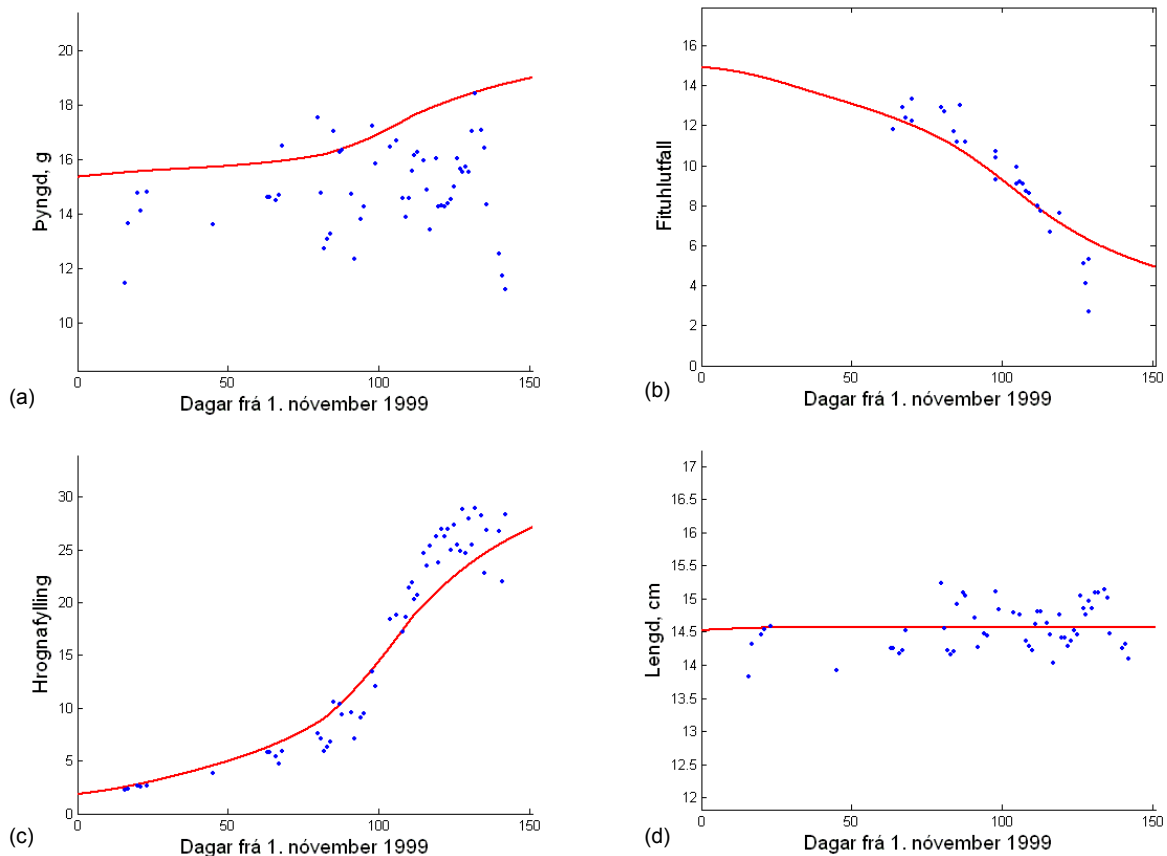
¹ Metið út frá gögnum

² Valið

³ Stillt

⁴ Frá Veer o.fl. (2001)

⁵ Frá Anthony o.fl. (2000)



21. mynd. Samanburður mælinga á þriggja ára kynþroska hrygna frá vertíðinni 1999–2000 (bláir punktar) og hins kvika orkubúskaps (rauðir ferlar), sjá jöfnur (13)–(15). Mynd (a) Þyngd, (b) Fituhlutfall, (c) Hrognafylling, (d) Lengd.

Figure 21. Comparison between measurements of 3 year old mature female capelin during the 1999–2000 season (blue dots) and the DEB model (red curves), see equations (13)–(15): (a) Weight, (b) Fat percentage, (c) Roe percentage, (d) Length.

þyngd fitu, W_{fita} , og þyngd hrogna, W_{hrogn} , yfir tímabilið út frá jöfnum (13)–(15). Á 21. mynd eru þessar niðurstöður sýndar sem (rauðir) ferlar fyrir W , W_{fita} / W og W_{hrogn} / W , auk lengdar ásamt (bláum) punktum sem sýna tilsvareandi mæligildi frá Hafrannsóknastofnuninni og Mátis. Við athugum að vatnsinnihald loðnuhrognanna breytist umtalsvert á þessu tímabili eins og fram kemur á 17. mynd a (Margeir Gissurarson o.fl. 2009). Í samræmi við þetta létum við gildið á ρ_r breytast yfir tímabilið eins og sýnt er á 17. mynd b.

Niðurstaða er þannig sú að líkan sem byggir á kvika orkubúskapnum geti nýst vel til að segja fyrir um breytingu á þroska loðnu meðan á hrygningargöngu stendur. Jafnframt er þetta vísbending um að slíkt líkan geti nýst við að líkja eftir öllu lífsferli loðnunnar á heildstæðan hátt, líkt og tekist hefur að gera fyrir ansjósu í Biskajaflóa (Pecquerie o.fl. 2009).

Umræða

Líkanið, sem beitt var á hrygningargöngu loðnunnar árið 2008, tók ekki mið af orkuforða og kynþroska hvers fisks en vitað er að slíkir þættir hafa áhrif á hegðun loðnunnar. Búið er að forrita lausnir jafna (7) til (12) og er því hægt að bæta þætti kynþroska inn í göngulíkanið. Hrognþroski loðnu virðist til dæmis stjórna hvenær hún leitar í heitari sjó til þess að hrygna. Þessa hegðun getum við fengið fram með því að hækka kjörhitastigsbil einda þegar ákveðinni hrognafyllingu er náð. Að auki er vitað að loðna eykur sundhraða sinn þegar nær kemur að hrygningu. Við höfum útfært hvernig hraði einda getur stjórnað af hrognþroska og hraða granneinda og verður það gert á svipaðan hátt og stefna einda er reiknuð í jöfnu (2). Sjá nánar í Baldvin Einarsson (2011). Er vonast til að eftir það fái betri mynd af tímasetningu hrygningargöngunnar.

Vegna þess hve gönguhegðun loðnunnar er háð hitastigi og sjávarstraumum er mikilvægt að hafa sem nákvæmastar upplýsingar þar um bæði í tíma og rúmi. Þær fást ekki nema með því að flétta

saman mæliniðurstöður við reiknilíkön sem lýsa breytingum á þessum þáttum með tíma. Slík líkön hefur sárlega vantað en nú hefur haf-fræðingurinn Kai Logemann, sem vinnur með rannsóknarhópi Guðrúnar Marteinsdóttur, prófessors, lokið við frumgerð líkans sem ætti að nýtast mjög vel til að fá fram þessar upplýsingar. Þær rannsóknir falla því mjög vel að rannsóknunum á gönguhegðun loðnunnar. Er vonast til að þannig fái betri og raunhæfari mynd af straumunum en sú sem nú er notast við.

Í Barbaro o.fl. (2009) er sett fram samband sem lýsir því hvernig breyta þurfi stikum líkansins eftir því hversu margir fiskar svari til hvernar eindar í líkaninu. Mikilvægt er að sannreyna það samband og er nú unnið að því að gera slíkt með víðtækum tölulegum út-reikningum.

Könnuð verður nánari útfærsla á því hvernig megi nýta samhliða keyrslur til þess að hraða reikningum og fjölga þá jafnframt þeim eindum sem líkanið ræður við. Þetta lýtur bæði að herm-uninni á því hvernig eindirnar ferðast með tíma, en einnig að meðhöndlun umhverfisgagna um hitastig og strauma, sem verður mun umfangs-meiri þegar tekið er nánara tillit til breytinga á þessum þáttum með tíma.

Líkanreikningarnir hafa hingað til ein-skorðast við hrygningargöngur kringum landið. Stefnt er að því líkja einnig eftir fæðugöngum loðnunnar í Íslandshafi. Til þess hefur skort gögn um hitastig og sjávarstrauma auk út-breiddslu loðnunnar. Einnig vantar gögn um fræðuframboð en slíkar mælingar eru frekar erfiðar og kostnaðarsamar. Nú verður skoðað hvort unnt reynist með líkani Kai Logemann og þeim mælingum á þessu hafsvæði, sem fengist hafa í rannsóknaverkefni um vistkerfi Íslandshafs, að fylla nægilega upp í eyðurnar til þess að búa til raunhæft fæðugöngulíkan.

Þakkir

Við þökkum sérstaklega Héðni Valdimarsyni, Ólafi K. Pálssyni, Sveini Sveinbjörnssyni og Þorsteini Sigurðssyni fyrir veitta hjálp í formi gagna, upplýsinga og almennrar aðstoðar. Einnig á Matís skildar þakkir fyrir auðveittan aðgang að gögnum varðandi fituinnihald loðnu. Kai Logemann hefur unnið að sérstaklega áhugaverðu líkani að strauma- og hita-stigi í sjónum kringum Ísland og erum við afar þakklát fyrir þau gögn. Að lokum vilja BE og AB þakka Hafrannsóknastofnuninni fyrir fjárstyrki.

Heimildir

- Anthony, J. A., Roby, D. D. & Turco, K. R. 2000. Lipid content and energy density of forage fishes from the northern Gulf of Alaska. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 248: 53–78.
- Aoki, I. 1982. A Simulation Study on the Schooling Mechanism in Fish. *Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries* 48: 1081–1088.
- Baldvin Einarsson 2011. An Interacting Particle Model and Dynamic Energy Budget Model: Analysis and Applications. Doktorsritgerð við Háskóla Íslands.
- Baldvin Einarsson, Björn Birnir & Sven Sigurðsson 2011. A Dynamic Energy Budget (DEB) model for the energy usage and reproduction of the Icelandic capelin (*Mallotus villosus*). *Journal of Theoretical Biology* 281: 1–8.
- Barbaro, A., Baldvin Einarsson, Björn Birnir, Sven Sigurðsson, Héðinn Valdimarsson, Ólafur K. Pálsson, Sveinn Sveinbjörnsson & Þorsteinn Sigurðsson 2009. Modelling and Simulations of the Migration of Pelagic Fish. *ICES Journal of Marine Science* 66: 826–838.
- Barbaro, A. B. T. 2008. An interacting particle model for the migrations of pelagic fish. Doktorsritgerð við Kaliforníuháskóla í Santa Barbara.
- Björn Birnir 2007. An ODE model of the motion of pelagic fish. *Journal of Statistical Physics* 128: 535–568.
- Couzin, I. D., Krause, J., James, R., Ruxton, G. & Franks, N. 2002. Collective memory and spatial sorting in animal groups. *Journal of Theoretical Biology* 218: 1–11.
- Eyjólfur Friðgeirsson 1976. Observations on Spawning Behaviour and Embryonic Development of the Icelandic Capelin. *Rit Fiskideildar* 5(4): 3–16.
- Frank, K. T. & Leggett, W. C. 1981. Prediction of Egg Development and Mortality Rates in Capelin (*Mallotus villosus*) from Meteorological, Hydrographic, and Biological Factors. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 38(11): 1327–1338.
- Gurney, W. S. C. & Nisbet, R. M. 1998. *Ecological Dynamics*. Oxford University Press, New York 1998.
- Hemelrijk, C. K. & Hildenbrandt, H. 2008. Self-Organized Shape and Frontal Density of Fish Schools. *Ethology* 114: 245–254.

- Hemelrijk, C. K. & Kunz, H. 2005. Density distribution and size sorting in fish schools: an individual-based model. *Behavioral Ecology* 16: 178–187.
- Hendratta, M. & Björn Birnir. The dynamics of myxobacteria life cycle. Mun birtast í *Physical Reviews E*.
- Hjálmar Vilhjálmsson 1994. The Icelandic capelin stock. *Rit Fiskideildar XIII*: 281 bls.
- Hjálmar Vilhjálmsson 2002. Capelin (*Mallotus villosus*) in the Iceland-East Greenland-Jan Mayen ecosystem. *ICES Journal of Marine Science* 59: 870–883.
- Hjálmar Vilhjálmsson & Carscadden, J. E. 2002. Assessment surveys for capelin in the Iceland-East Greenland-Jan Mayen area, 1978-2001. *ICES Journal of Marine Science* 59: 1096–1104.
- Hubbard, S., Babak, P., Sven Sigurðsson & Kjartan G. Magnússon 2004. A model of the formation of fish schools and migration of fish. *Ecological Modelling* 174: 359–374.
- Huth, A. & Wissel, C. 1992. The Simulation of the Movement of Fish Schools. *Journal of Theoretical Biology* 156: 365–385.
- Huth, A. & Wissel, C. 1994. The Simulation of Fish Schools in comparison with experimental data. *Ecological Modelling* 75: 135–146.
- Kjartan G. Magnússon & Ólafur K. Pálsson 1991. Predator-prey interactions of cod and capelin in Icelandic waters. *ICES Marine Science Symposium* 193: 153–170.
- Kjartan G. Magnússon, Sven Sigurðsson & Baldvin Einarsson 2004. A discrete and stochastic simulation model for migration of fish with application to capelin in the seas around Iceland. Science Institute, University of Iceland, RH-20-2004.
- Kjartan G. Magnússon, Sven Sigurðsson & Eva Hlín Dereksdóttir 2005. A simulation model for capelin migrations in the North-Atlantic. *Nonlinear Analysis-Real World Applications* 6: 747–771.
- Kjartan G. Magnússon, Sven Sigurðsson, Babak, P., Stefán Freyr Guðmundsson & Eva Hlín Dereksdóttir 2004. A continuous density Kolmogorov type model for a migrating fish stock. *Discrete and Continuous Dynamical Systems-Series B* 4: 695–704.
- Kjartan G. Magnússon & Thor Aspelund 1997. A model for estimating meal frequency and meal size from stomach data with an application to Atlantic cod (*Gadus morhua*) feeding on capelin (*Mallotus villosus*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 54: 876–889.
- Kooijman, S. A. L. M. 2010. *Dynamic Energy Budget Theory For Metabolic Organisation*. Cambridge University Press, Cambridge, 2010.
- Kooijman, S. A. L. M. 2001. Quantitative aspects of metabolic organization: a discussion of concepts. *Philosophical transactions of the Royal Society of London B* 356: 331–349.
- Kooijman, S. A. L. M., Sousa, T., Pecquerie, L., van der Meer, J. & Jager, T. 2008. From food-dependent statistics to metabolic parameters, a practical guide to the use of dynamic energy budget theory. *Biological Reviews* 83: 533–552.
- Kunz, H. & Hemelrijk, C. K. 2003. Artificial fish schools: collective effects of school size, body size, and body form. *Artificial Life* 9: 237–253.
- Kunz, H., Züblin, T. & Hemelrijk, C. K. 2006. On prey grouping and predator confusion in artificial fish schools. *Proceedings of the Tenth International Conference of Artificial Life*. MIT Press, Cambridge, MA.
- Logemann, K. & Harms, I. 2006. High resolution modelling of the North Icelandic Irminger Current (NIIC). *Ocean Science*, 2: 291–304.
- Margeir Gissurarson, Hannes Magnússon, Ragnheiður Sveinþórsdóttir & Garate, C. 2009. Compilation of previous test results of capelin roes. *Innovation and Safety*. Report from Matis Food Research.
- Nisbet, R. M., Muller, E. B., Lika, K. & Kooijman, S. A. L. M. 2000. From molecules to ecosystems through dynamic energy budget models. *Journal of Animal Ecology* 69: 913–926.
- Pecquerie, L., Petitgas, P. & Kooijman, S. 2009. Modeling fish growth and reproduction in the context of the dynamic energy budget theory to predict environmental impact on anchovy spawning duration. *Journal of Sea Research* 62: 93–105.
- Schlitzer, R. Ocean Data View. <http://odv.awi.de>, 2010.
- Sven Sigurðsson, Kjartan G. Magnússon, Babak, P., Stefán F. Guðmundsson & Eva Hlín Dereksdóttir 2002. Dynamic continuous model of fish migration. *RH-25-2002*. Science Institute, University of Iceland.
- van der Veer, H., Kooijman, S. & van der Meer, J. 2001. Intra- and interspecies comparison of energy flow in North Atlantic flatfish species by means of dynamic energy budgets. *Journal of Sea Research* 45: 303–320.

-
- Viscido, S. V., Parrish, J. K. & Grünbaum, D. 2004. Individual behavior and emergent properties of fish schools: a comparison of observation and theory. *Marine Ecology Progress Series* 273:239–249.
- Viscido, S. V., Parrish, J. K. & Grünbaum, D. 2005. The effect of population size and number of influential neighbours on the emergent properties of fish schools. *Ecological Modelling* 183: 347–363.
- Wetterzentrale. 2008, 5. febrúar. Slóðin er: www.wetterzentrale.de/topkarten/ fsfaxsem.html.
- Youseff, L. M., Barbaro, A. B. T., Trethewey, P. F., Björn Birnir & Gilbert, J. 2008. Parallel modeling of fish interaction. Í *IEEE 11th International Conference on Computational Science and Engineering*. Sao Paolo, Brazil, 2008.
-

