



HAF- OG VATNARANNSÓKNIR

MARINE AND FRESHWATER RESEARCH IN ICELAND

Arnarfjörður: Ástand sjávar, straumar og endurnýjun botnlags
*/ Arnarfjörður: Hydrographic conditions,
currents and renewal of bottom layer*

Andreas Macrander, Sólveig R. Ólafsdóttir, Magnús Daníelsen, Hjalti Karlsson, Arnþór
Bragi Kristjánsson og Jacek Sliwinski

Arnarfjörður: Ástand sjávar, straumar og
endurnýjun botnlags
*/ Arnarfjörður: Hydrographic conditions, currents
and renewal of bottom layer*

Andreas Macrander, Sólveig R. Ólafsdóttir, Magnús Daníelsen,
Hjalti Karlsson, Arnþór Bragi Kristjánsson og Jacek Sliwinski

Upplýsingablað

Titill: Arnarfjörður: Ástand sjávar, straumar og endurnýjun botnlags / <i>Arnarfjörður: Hydrographic conditions, currents and renewal of bottom layer</i>		
Höfundur: Andreas Macrander, Sólveig R. Ólafsdóttir, Magnús Daníelsen, Hjalti Karlsson, Arnþór Bragi Kristjánsson og Jacek Sliwinski		
Skýrsla nr: HV 2021-38	Verkefnisstjóri: Sólveig R. Ólafsdóttir	Verknúmer: 9233
ISSN 2298-9137	Fjöldi síðna: 47	Útgáfudagur: 17. ágúst 2021
Unnið fyrir: Hafrannsóknastofnun og Umhverfissjóð sjókvíaelis	Dreifing: Opin	Yfirfarið af: Steingrímur Jónsson
Ágrip Undanfarin ár hefur Hafrannsóknastofnun staðið fyrir rannsóknum á ástandi sjávar og umhverfi í flestum fjörðum landsins. Þekking á straumum og vistkerfi fjarða nýtist m.a. fyrir burðarþolsmat m.t.t. sjókvíaelis. Skýrsla þessi fjallar um ástand sjávar, strauma og endurnýjun botnlags í Arnarfirði á grundvelli umfangsmikilla athugana Hafrannsóknastofnunar undanfarin ár. Arnarfjörður hefur þá sérstöðu meðal íslenskra fjarða að hann hefur grunna þröskuld í fjarðarmynninu með þröskuldsdýpi 65 m en innar er víða meira dýpi allt að 113 m. Helstu niðurstöður eru að Arnarfjörður er vel blandaður á veturna, en lagskiptur á sumrin. Meginstraumar í Arnarfirði utan Langaness eru inn fjörðinn sunnan megin og út norðanmegin og vatnsskipti fyrir ofan þröskuldsdýpi eru mikil. Hins vegar er botnlagið sem er fyrir neðan 65 m dýpi að mestu leyti einangrað frá maí fram í nóvember ár hvert, og súrefnismettun í því lagi lækkar frá 90 % niður í 30 – 60 % áður en endurnýjun fer fram um haustið. Endurnýjun botnlags og uppblöndun sjávar í firðinum gerist þegar lagskipting hverfur vegna kólnunar á yfirborði og aukinni eðlisþyngd strandsjávar sem streymir inn í fjörðinn. Abstract <i>In recent years, the Marine and Freshwater Research Institute (MFRI) carried out measurements of the environmental conditions in most of the fjords in Iceland. Data on circulation and environmental conditions are basis for assessing carrying capacity of the fjords which are increasingly utilized for aquaculture. This report discusses hydrographic</i>		

conditions, currents and renewal of the bottom layer in Arnarfjörður, a large fjord in the Westfjord region, based on comprehensive observations carried out by MFRI in recent years. Arnarfjörður is unusual for Icelandic fjords, as it has a deep basin and a shallow sill at the entrance. Key results are that the water column in Arnarfjörður is well mixed during winter, but stratified in summer. Water exchange above the sill depth is strong, with inflow of coastal water mainly on the southern side of the fjord, and outflow on the northern side. In contrast, the bottom layer below 65 m depth, is largely isolated between May and November each year, with oxygen levels lowering from 90 % to 30 – 60 % saturation during this period. The bottom layer is renewed in fall and winter mixing in the fjord occurs when stratification is reduced due to surface cooling and higher density of the inflowing coastal water.

Lykilorð: Arnarfjörður, ástand sjávar, straummælingar, súrefni, endurnýjun, fiskeldi, burðarþolsmat

Key words: Arnarfjörður, hydrography, current measurements, oxygen, renewal, aquaculture, carrying capacity

Undirskrift verkefnisstjóra:



Undirskrift forstöðumanns sviðs:



Efnisyfirlit

Bls.

Inngangur	1
Efniviður og aðferðir	1
Staðhættir	1
Rannsóknaleiðangrar og mælingar á eðlis- og efnafræðilegum þáttum	4
Straumlagnir	6
Vöktunarbauja með rauntímamiðlun gagna	10
Niðurstöður	11
Ástand sjávar í Arnarfirði	11
Hiti, selta og súrefnisstyrkur í botnlagi	15
Straumar og vatnsskipti	19
Umræður	25
Áhrif vinda á strauma	25
Mat á endurnýjun yfirborðs- og miðlags	26
Mat á endurnýjun botnlags að sumarlagi	26
Endurnýjun og alblöndun í nóvember	27
Súrefni í botnlagi að sumar- og haustlagi	28
Mat á kolefnisflæði til botnlags	29
Samantekt	31
Þakkarorð	31
Heimildir	32
Viðaukar	33

Töfluskrá

Tafla 1. Helstu stærðartölur frá Arnarfirði	3
Tafla 2. Rannsóknaleiðangrar og fjöldi sondustöðva í Arnarfirði 2013 – 2020	5
Tafla 3. Straumlagnir í Arnarfirði 2010 – 2020	9
Tafla 4. Vöktunarbaujur með rauntímamiðlun gagna í Arnarfirði 2018 – 2021	10
Tafla 5. Súrefnisstyrkur í botnlagi Arnarfjarðar árin 2014 – 2020	29
Tafla 6. Mat á súrefnis- og kolefnisflæði til botnlags	30

Myndaskrá

1. mynd. Kort með örnefnum og botndýpi Arnarfjarðar	2
2. mynd. Kort með sondustöðvum í Arnarfirði árin 2013 – 2020	5
3. mynd. Dæmi um straumlögn í Arnarfirði	6
4. mynd. Kort með staðsetningum allra straumlagna í Arnarfirði árin 2010 – 2020	8
5. mynd. Vöktunarbauja í Arnarfirði	10

6. mynd. Prófilar frá yfirborði til botns frá 199 sondustöðvum í Arnarfirði frá árunum 2013 – 2020	11
7. mynd. Sondusnið frá utanverðum Arnarfirði (til vinstri) inn í Fossfjörð (til hægri) að haustlagi, þ. 1. október 2019	13
8. mynd. Súrefnismettun (%) við botn þ. 5. október 2018.....	14
9. mynd. Sondusnið þvert yfir Arnarfjörð frá Hringsdal í suðri (til vinstri) til Hlaðsbótar í norðri (til hægri) að sumarlagi, mælt þ. 16. ágúst 2014	14
10. mynd. Mælingar á hita (°C), seltu og eðlisþyngd ($\text{kg m}^{-3} - 1000$) við botn í Arnarfirði árin 2014 – 2020.....	17
11. mynd. Mælingar á súrefnisstyrk (mL L^{-1}) og súrefnismettun (%) við botn í Arnarfirði árin 2014-2020	18
12. mynd. Kort af Arnarfirði. Staðsetning straumlagna frá 2010 – 2020 og mældur meðalstraumur.....	19
13. mynd. Meðalstraumprófilar í utanverðum Arnarfirði, við ARSA (sunnanmegin, innstreymi) og ARNV (norðanmegin, útstreymi) árin 2015 – 2016.....	20
14. mynd. Vindur og straummælingar í Arnarfirði, dæmið sýnir 12 daga í september – október 2015	21
15. mynd. Straumur febrúar – nóvember 2015 við ARNV, norðanmegin utarlega í Arnarfirði, og vindmælingar á Bíldudal	22
16. mynd. Inn- og útstreymi við ARSA, sunnanmegin í utanverðum Arnarfirði, á árunum 2015-2016	23
17. mynd. Inn- og útstreymi við ARSA, sunnanmegin í utanverðum Arnarfirði, haustið 2015	24
18. mynd. Súrefnismettun við botn við upphaf vetrarblöndunar á haustin 2014 og 2015	25

Viðaukar

Viðauki 1. Mynd A1. Fossfjörður 2011. 14. des. 2010 – 1. feb. 2011	33
Viðauki 2. Mynd A2. ASNV Suðurfirðir norðvestur, 16. ágú. 2014 – 13. feb. 2015	34
Viðauki 3. Mynd A3. ASSV Suðurfirðir suðvestur, 16. ágú. 2014 – 13. feb. 2015	35
Viðauki 4. Mynd A4. ASSA Suðurfirðir suðaustur, 16. ágú. 2014 – 13. feb. 2015.....	36
Viðauki 5. Mynd A5. ASNA Suðurfirðir norðaustur, 16. ágú. 2014 – 13. feb. 2015	37
Viðauki 6. Mynd A6. ARSA Arnarfjörður suðaustur, 13. feb. 2015 – 19. jan. 2016	38
Viðauki 7. Mynd A7. ARNA Arnarfjörður norðaustur, 13. feb. 2015 – 19. jan. 2016.....	39
Viðauki 8. Mynd A8. ARNV Arnarfjörður ytri norðvestur, 13. feb. 2015 – 20. okt. 2015	40
Viðauki 9. Mynd A9. FOSS Fossfjörður (Fjarðarlax), 5. sep. 2015 – 4. jan. 2016	41
Viðauki 10. Mynd A10. TROS Trostansfjörður (Fjarðarlax), 5. sep. 2015 – 31. jan. 2016	42
Viðauki 11. Mynd A11. ARNV2018 Arnarfjörður ytri norðvestur, 19.maí 2017–12.feb. 2018	43
Viðauki 12. Mynd A12. BAUJA 1 vöktunarbauja, gögn frá 10. ágú. 2018 – 1. apr. 2019	44
Viðauki 13. Mynd A13. BAUJA 1 vöktunarbauja, gögn frá 1. apr. 2019 – 1. apr. 2020.....	45
Viðauki 14. Mynd A14. BAUJA 1 og 2 vöktunarbaujur, gögn frá 1. apr. 2020 – des. 2020	46

Inngangur

Arnarfjörður er einn stærsti fjörður á Vestfjörðum. Hann hefur nokkra sérstöðu meðal fjarða á Íslandi þar sem hann er þröskuldsfjörður með lítilli endurnýjun í botnlaginu yfir sumar- og haustmánuðina. Í firðinum er rækjuveiði og jafnframt sjókvíaelði í auknum mæli, sem eykur álag á vistkerfið.

Sjórinn á landgrunninu úti fyrir Vestfjörðum er að mestu leyti hlýr og selturíkur Atlantssjór, en allra næst landi er ferskvatnsblandaður sjór (strandsjór) þar sem seltan er lægri og breytilegri. Ástand sjávar í fjörðum eins og Arnarfirði tengist aðstæðum á landgrunni þar sem vatnsskiptin eru mikil. Hins vegar getur myndast ferskt og hlýtt yfirborðslag í fjörðum að sumarlagi vegna ferskvatnsrennslis frá landi og upphitunar. Þröskuldur við fjarðarmynni getur haft takmarkandi áhrif á endurnýjun botnlags. Mælingar á þessum haffræðilegu þáttum er eitt helsta viðfangsefni skýrslunnar.

Grunnrannsóknir, svo sem rannsóknir á straumum, hita, seltu, næringarefnum, súrefni, svifþörungum, dýrasvifi, botndýrum, fiskeggjum og fisklirfum, voru almennt litlar á grunnsævi við Ísland þegar fiskeldi í sjókvíum fór að aukast upp úr árinu 2010. Skortur á þekkingu á umhverfinu hefur einnig komið fram við mat á umhverfisáhrifum framkvæmda inni á fjörðum víða í kringum land. Síðan þá hafa athuganir af þessu tagi aukist mjög, einkum vegna verkefnis sem lýtur að ráðgjöf um burðarþol fjarða og sjókvíaelðissvæða m.t.t. fiskeldis. Það verkefni skiptist í tvo meginþætti en þeir eru annars vegar að að afla gagna um umhverfið einkum um straumakerfi fjarða og vatnsskipti og svo hins vegar að nota þær upplýsingar ásamt líkönum til að meta áhrif lífræns úrgangs frá fiskeldi á umhverfisskilyrði í fjörðunum.

Í þessari skýrslu verður greint frá niðurstöðum rannsókna á haffræði Arnarfjarðar á grundvelli umfangsmikilla athugana Hafrannsóknastofnunar undanfarin ár.

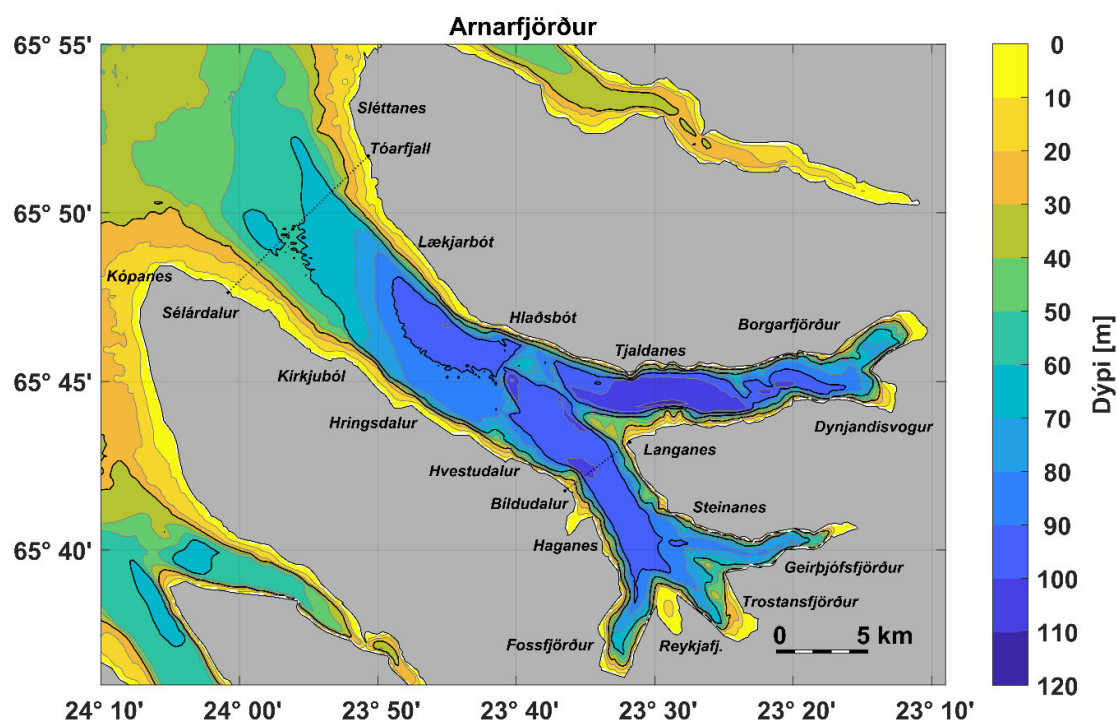
Efniviður og aðferðir

Skýrslan lýsir mælingum sem gerðar voru frá skipum, straumlögnum á hafsbotni og bauju með rauntímamiðlun gagna. Í upphafi verður þó greint frá staðhättum í Arnarfirði, þar sem landfræðilegar aðstæður skipta miklu máli fyrir val á mælistöðum og túlkun niðurstaðna.

Staðhættir

Arnarfjörður er einn af syðri fjörðunum á Vestfjörðum (Anon., 2017). Hann er um 9 km á breidd í fjarðarkjafninum en mjókkar er innar dregur og er um 7 km á breidd rétt utan við Bíldudal (mynd 1). Aðalfjörðurinn klofnar við Langanes en hlutinn fyrir norðan nesið heitir Borgarfjörður. Sunnan við Langanes liggur fjörðurinn til suðurs og endar í svokölluðum

Suðurfjörðum. Þeir eru fjórir, Fossfjörður, Reykjafjörður, Trostansfjörður sem allir eru stuttir og Geirþjófsfjörður sem er nyrstur og lengstur en örmjór. Frá fjarðarmynni inn að Langanesi eru um 20 km en þaðan inn í Borgarfjörð um 16 km. Frá Langanesi inn í botn á Geirþjófsfirði eru einnig um 16 km. Alls er því Arnarfjörður um 36 km langur frá fjarðarmynni að botni. Heildarflatarmál fjarðarins með innfjörðum er um 274 km² en nánari tölulegar upplýsingar um flatarmál, rúmmál o. fl. tengt sjófræði og hringrás sjávar í firðinum má sjá í töflu 1.



1. mynd. Kort með örnefnum og botndýpi Arnarfjarðar. Dýptargögn byggja á fjölgeislaælingum. Litir aðgreina 10 m dýptarbil, en svartar línur eru við 30, 60 og 90 m dýpi. Punktallínur greina ytri mörk Arnarfjarðar og Suðurfjarða sem notuð eru í skýrslunni.

Figure 1: Place names and bathymetry of Arnarfjörður, based on multibeam data. Color interval 10 m; black contours denote 30, 60 and 90 m depth. Dotted lines denote outer boundary of Arnarfjörður and Suðurfirðir, as used in this report.

Arnarfjörður er með svokallaðan þröskuld eða grunn í fjarðarmynninu sem er grynna en fjörðurinn þar fyrir innan. Arnarfjörður er einn af örfáum þröskuldsfjörðum sem finnast á Íslandi og hefur þannig mikla sérstöðu. Dýpi í firðinum er yfirleitt á milli 80 og 110 m (mynd 1), en dýpi í fjarðarmynni er aðeins um 50 m, og jafnvel enn grynna (38 m) um 5 – 10 km fyrir utan fjörðinn. Þröskuldurinn gerir það að verkum að aðstæður í Arnarfirði líkjast því sem finnst í mörgum fjörðum í Noregi þar sem þröskuldsfirðir eru algengir. Áhrif þröskuldarins eru þó minni en búast má við því hann er staðsettur frekar utarlega þar sem straumur og öldugangur getur verið mikill sem minnka áhrif haftsins. Í frekari greiningu, út frá gögnum og með líkönum, er því miðað við þröskuldsdýpi 65 m á línu frá Serlárdal að Tóarfjalli sem hér er notuð til að afmarka ytri mörk fjarðarins.

Tafla 1. Helstu stærðartölur frá Arnarfirði.

Table 1: Key dimensions of Arnarfjörður.

	Arnarfjörður (allur fjörðurinn)	Suðurfirðir
Mesta dýpi	113 m	104 m
Meðaldýpi	63 m	59 m
Lengd	36 km	12,5 km
Breidd	3 – 7 km	4 – 6 km
Flatarmál	274 km ²	67 km ²
Rúmmál	17,4 km ³	4,0 km ³
Rúmmál ofan við þröskuldsdýpi 65 m	13,9 km ³	N/A
Rúmmál botnlags (65 m – 113 m)	3,6 km ³	N/A
Þröskuldur mesta dýpi	65 m	(104 m)
Þröskuldur meðaldýpi	43 m	(72 m)
Þröskuldur breidd	10,6 km	(4,2 km)
Þröskuldur þversnið	461.000 m ²	(297.000 m ²)
Ath.: Ytri mörk Arnarfjarðar miðast við línu milli Serlárdals og Tóarfjalls, sjá mynd 1. Ytri mörk Suðurfjarða miðast við línu milli Bíldudalsfjalls og Langaness, en það er enginn þröskuldur á þessu sniði og því ekki hægt að tilgreina aðskilið botnlag í Suðurfjörðum.		

Í firðinum sjálfum finnast svo nokkrir hryggir. Sá helsti af þeim kallast Hvesta og liggur þvert yfir fjörðinn á milli Hvestudals og Hlaðsbótar og svo er annar hryggur frá Langanesi að Hlaðsbót. Þessir hryggir (sem eru fornir jökulgarðar) rísa 20 til 40 m yfir sjávarbotninn en frá meira en 100 m dýpi sem er innan við alla hryggina. Einnig eru jökulgarðar í Borgarfirði. Þröskuldurinn við fjarðarmynnið er því langhæstur upp frá botni og takmarkar hann endurnýjun botnlagsins í öllum firðinum.

Við ströndina finnast víða brattar hlíðar, sem valda því að flatarmál í dýptarbilinu 30 – 65 m er frekar lítið. Einnig er lítið svæði þar sem dýpi er minna en 30 m, einungis innst í Suðurfjörðunum og í Borgarfirði eru fremur stór svæði þar sem grynna er. Á grunnu svæðunum finnast setlög úr kalkþörungum. Búsvæði botnþörungum og þara ná frá fjöru niður á um 30 m dýpi og eru stærstu svæðin í fjarðabotnum.

Vatnasvið Arnarfjarðar er um 789 km² en vatnsmestu árnar renna í fjörðinn innst í Borgarfirði og í Suðurfjörðum.

Rannsóknaleiðangrar og mælingar á eðlis- og efnafræðilegum þáttum

Ástand sjávar í Arnarfirði hefur verið mælt á rannsóknaleiðöngrum á öllum árstímum, oftast á rannsóknaskipinu Bjarna Sæmundssyni sem hluti af reglubundnum athugunum á umhverfis-aðstæðum sem gerðar eru í febrúar, maí, ágúst og október/nóvember ár hvert. Auk þess hafa athuganir verið gerðar í árlegum leiðöngrum til mælinga á stofnstærð rækju í október og í nokkrum ferðum á minni skipum. Í þessu verkefni um burðarpólsmat íslenskra fjarða hefur gagnaöflun einkum verið á árabílinu 2013 – 2020 en margvísleg önnur gögn Hafrannsóknastofnunar voru einnig notuð.

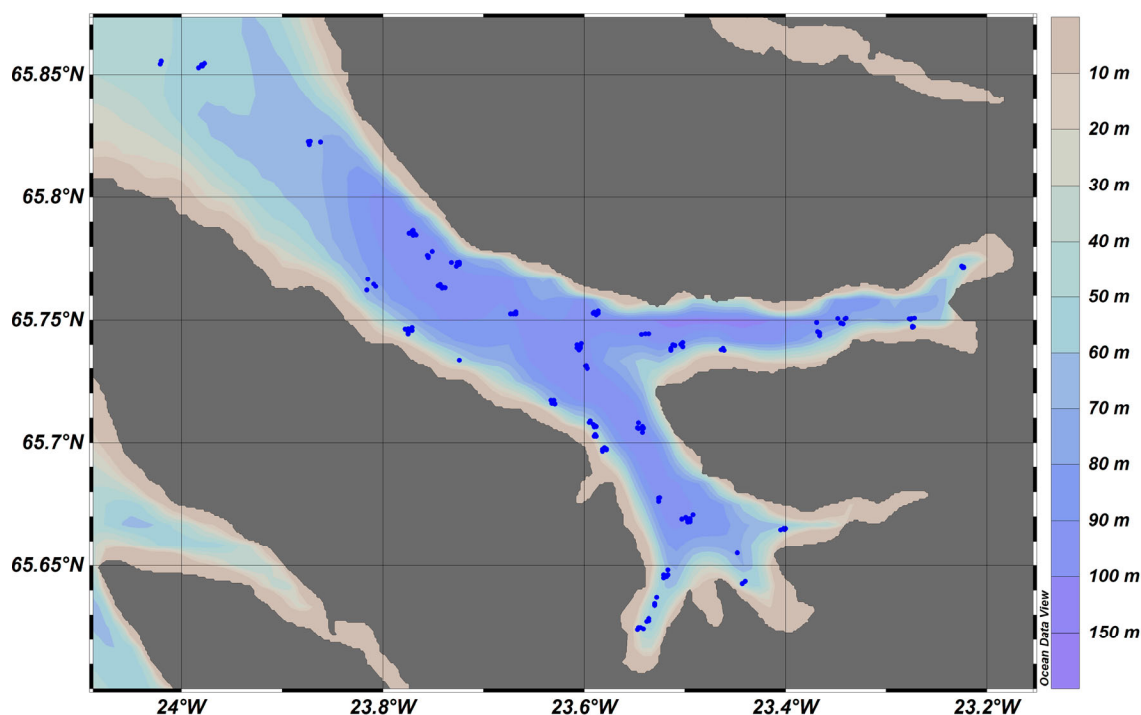
Eðlis- og efnafræðilegir eiginleikar sjávar eru mældir með sítitandi tæki, sondu (e. CTD – conductivity, temperature, depth) sem slakað er í gegnum vatnssúluna. Sondan mælir hita, seltu og þrýsting á leiðinni niður frá skipinu að botni. Hiti, selta og þrýstingur ráða eðlisþyngd sjávar sem skiptir miklu máli fyrir lagskiptingu og blöndun vatnssúlunnar. Í þessari skýrslu er eðlisþyngd gefin sem σ_θ (sigma-theta) (kg m^{-3}) en sú stærð er fengin með því að draga 1000 frá eðlisþyngdinni. Auk þess mælir sondan ljómun (sem er vísbending um magn blaðgrænu) og súrefnistyrk. Súrefnisstyrkur er gefinn í mL L^{-1} , en súrefnismettun er reiknuð út frá mældum styrk súrefnis og fræðilegri leysni þess miðað við hita, seltu og þrýsting.

Allir nemar á sondunni eru kvarðaðir reglulega og mælingar á súrefni bornar saman við Winkler mælingar á sjónsýnum. Nákvæmni sondugagna er um $\pm 0,002\text{ }^\circ\text{C}$ (hiti), $\pm 0,001\text{ psu}$ (selta), og $\pm 0,02\text{ mL L}^{-1}$ (súrefni).

Sjónsýni voru tekin á mismunandi dýpum til mælinga á næringarefnum, plöntusvifi o.fl. en þeim gögnum er ekki lýst í þessari skýrslu, en það má benda á Sólveig R. Ólafsdóttir o.fl. (2017).

Sondustöðvum er dreift um allan fjörðinn (mynd 2), en endurteknar mælingar eru gerðar reglulega á mikilvægustu stöðvunum sem staðsettar eru sunnan- og norðanmegin í firðinum til greiningar á inn- og útstreymi, og þar sem botndýpi er mest því þar verður súrefnisstyrkur lægstur. Alls hafa verið teknar 199 sondustöðvar í Arnarfirði á árunum 2013 – 2020 (tafla 2).

Auk sondumælinga voru tekin kjarnasýni af botnseti í nokkrum leiðöngrum, en niðurstöðum úr þeim mælingum er lýst í Rakel Guðmundsdóttir o.fl. (2020).



2. mynd. Kort með sondustöðvum í Arnarfirði árin 2013 – 2020, kortið sýnir staðsetningar og botndýpi.

Figure 2: CTD stations taken in Arnarfjörður in 2013 – 2020, map showing positions and bottom depth.

Tafla 2. Rannsóknaleiðangrar og fjöldi sondustöðva í Arnarfirði 2013 – 2020. B í upphafi leiðangursheitis merkir að leiðangurinn var á rs Bjarna Sæmundssyni, A stendur fyrir rs Árni Friðriksson, aðrir leiðangrar voru á öðrum skipum. Staðsetning stöðva táknar það svæði í Arnarfirði þar sem mælt var, AR táknar Arnarfjörð fyrir utan Langanes, SF táknar Suðurfirði og BF táknar Borgarfjörð. Sjá mynd 1 fyrir staðhættir og örnefni, og mynd 2 fyrir staðsetningu stöðva.

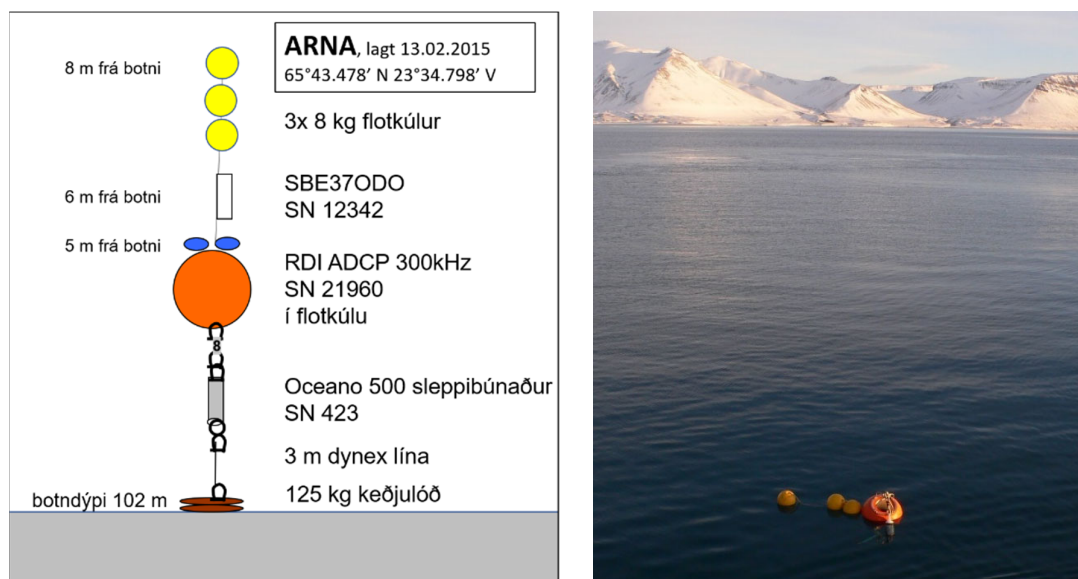
Table 2: Research cruises and number of CTD stations in Arnarfjörður 2013 – 2020. In the cruise IDs, B stands for R/V Bjarni Sæmundsson, A for Árni Friðriksson; OE and OR refer to other vessels. Location of the stations is indicated by AR (Arnarfjörður outside of Langanes), SF (Suðurfirðir) and BF (Borgarfjörður). See also figure 1 for place names, and 2 for station locations.

Leiðangur	Dagsetning	Fjöldi stöðva	Staðsetning stöðva		
OE201301	04. sep. 2013	11	AR	SF	
OR201302	10. okt. 2013	11	AR	SF	
B10-2013	14. nóv. 2013	14	AR	SF	BF
B01-2014	12. feb. 2014	15	AR	SF	BF
B05-2014	16. ágú. 2014	15	AR	SF	BF
B01-2015	13. feb. 2015	18	AR	SF	BF
A09-2015	17. sep. 2015	1		SF	
B03-2016	19. feb. 2016	15	AR	SF	BF
B15-2016	28. sep. 2016	16	AR	SF	BF
B07-2017	19. maí 2017	5	AR		
GU201701	25. okt. 2017	15	AR	SF	BF
B03-2018	12. feb. 2018	4	AR		
B07-2018	14. maí 2018	6	AR	SF	
B13-2018	05. okt. 2018	15	AR	SF	BF
B06-2019	15. maí 2019	6	AR	SF	
B11-2019	01. okt. 2019	15	AR	SF	BF
B06-2020	14. maí 2020	2	AR		
B11-2020	26. sep. 2020	15	AR	SF	BF
alls 18 leiðangrar		199 stöðvar			

Straumlagnir

Mælingar frá skipum er ekki hægt að gera mjög oft yfir árið, en samfelldar tímaraðir af ástandi sjávar og straumum fást með síritandi mælitækjum sem lögð eru við bauju (hér eftir kallaðar lagnir eða straumlagnir) nærri fjarðarbotni í allt að heilt ár. Þessar lagnir (mynd 3) haldast fastar á sinni staðsetningu með botnlóði en flotkúlur tryggja að mælitækin haldist upprétt og á föstu dýpi. Að mælingum loknum eru tækin endurheimt, en sleppibúnaður opnar krók við móttöku á þar til gerðu hljóðmerki og flotkúlurnar tryggja að lögnin rís að yfirborði.

Straumlagnir í Arnarfirði voru almennt útbúnar straumsjám (e. Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) til að mæla straum, og tækjum til mælinga á hita, seltu, þrýstingi og súrefni („míkróköttur“). Mælitækin eru knúin af orku úr rafhlöðum og geta mælt á hálf tíma fresti í allt að eitt ár. Gögnin eru geymd í minni sem lesið er af eftir að lögnin hefur verið tekin um borð í skip.



3. mynd. Dæmi um straumlögn í Arnarfirði. Til vinstri: Teikning af samsetningu lagnar sem lagt var á staðsetningunni ARNA. Myndin sýnir þau tæki sem fest eru á lögnina; straumsjám (ADCP) liggur hér 5 metra yfir botni og horfir upp að yfirborði. Hita-, seltu- og súrefnismælir (míkróköttur) er merktur SBE73ODO. Til hægri: straummælalögn ASNV á yfirborði sjávar 13. feb. 2015. Stóra appelsínugula kúlan inniheldur straummælinn (snúið á hvolft) og minni kúlurnar eru flotkúlur sem halda míkrókettinum uppi. Mynd: Andreas Macrander. Staðsetningar á ARNA og ASNV má sjá á mynd 4.

Figure 3: Typical design of a mooring in Arnarfjörður. Left panel: Drawing of the ARNA mooring deployed 2015. The drawing shows the instruments attached to the mooring; the ADCP is at 5 metres above the bottom, pointing upwards. SBE73ODO denotes temperature, salinity and oxygen recorder (Microcat). Right panel: Recovery of the ASNV mooring, 13 Feb. 2015. The large orange sphere is housing the ADCP (now upside down), the smaller floats provide buoyancy for the Microcat. Photo: Andreas Macrander. Mooring positions of ARNA and ASNV shown on Fig. 4.

Straumsjár

Straumsjár (e. Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP) mæla straumhraða og -stefnu. Tækin senda út hljóðmerki sem endurkastast frá ögnum í vatninu, en tíðni endurkasts breytist með straumhraða (dopplerhrif). Í Arnarfirði voru notaðar straumsjár af gerðinni RDI Workhorse Sentinel 300 kHz og 600 kHz ADCP (Teledyne RD Instruments, 2019). Tækjunum var lagt út nálægt botni á 100 m dýpi (600 kHz straumsjám var lagt á um 70 m dýpi vegna minni drægni), en þær mældu straumhraða og -stefnu í allri vatnssúlunni. Straumsjárnar í Arnarfirði voru almennt stilltar þannig að straummælingar fást á 4 m dýptarbil, frá um 11 m yfir botni og allt að yfirborði. Hafa skal þó í huga að straummælingar ná yfirleitt ekki nær að yfirborði en um 15 % af því dýpi sem mælitæki er á (þ.e. um 15 m dýpi ef mælirinn er á 100 m dýpi); nálægt yfirborði eru truflanir í gögnum þar sem endurkast frá yfirborðinu er sterkara en frá ögnum í sjó. Straumsjár reikna út meðalgildi 30 til 40 stakra mælinga og vista gögnin á hálf tíma fresti. Nákvæmni á straumhraða er um $0,6 \text{ cm s}^{-1}$ (staðalfrávik) fyrir hálf tíma meðaltöl, en staðalfrávik minnkar þegar horft er á meðaltöl yfir lengri tímabil.

Í úrvinnslu eru svo reiknaðir ýmsir þættir, eins og meðalstraumur og dreifing á straumhraða og -stefnu á mismunandi dýpi. Sjávarfallastraumar eru greindir með „tidal harmonic analysis“ (T_Tide, Pawlowicz et al., 2002), en það skal taka fram að sjávarfallastraumar í Arnarfirði eru ekki alltaf jafnstærkir og eru háðir öðrum þáttum (t.d. vindi) og því ekki hægt að nota líkanreikninga fyrir sjávarfallastrauma sem gera ráð fyrir reglubundinni sveiflu þeirra. Í staðinn hefur verið notaður 36 klst. Hamming-gluggi sem lágtíðnisá við að aðgreina sjávarfallastrauma frá meðalstraumi þegar gögnin ná yfir lengri tíma.

Mæligögn yfir straumhraða við yfirborð má ekki túlka sem raunverulegan straumhraða, en þessi gögn gefa vísbendingar um vindátt og vindhraða, með takmörkunum þó (Marmorino og Hallock, 2001) og notast í þeim tilgangi hér í skýrslunni.

Endurkastsstyrkur sem straumsjár vista samhliða straummælingum gefa vísbendingar um magn og lóðréttar færslur dýrasvifs, en í því samhengi má benda á Andreas Macrandar og Héðinn Valdimarsson (2016).

Mælingar á hita, seltu og súrefni

Flestar lagnirnar í Arnarfirði voru útbúnar Sea-Bird SBE37-SMP-ODO míkroketi (Sea-Bird, 2018) til mælinga á hita, seltu, þrýstingi og súrefnisstyrk í botnlaginu, yfirleitt á hálf tíma eða klukkutíma fresti.

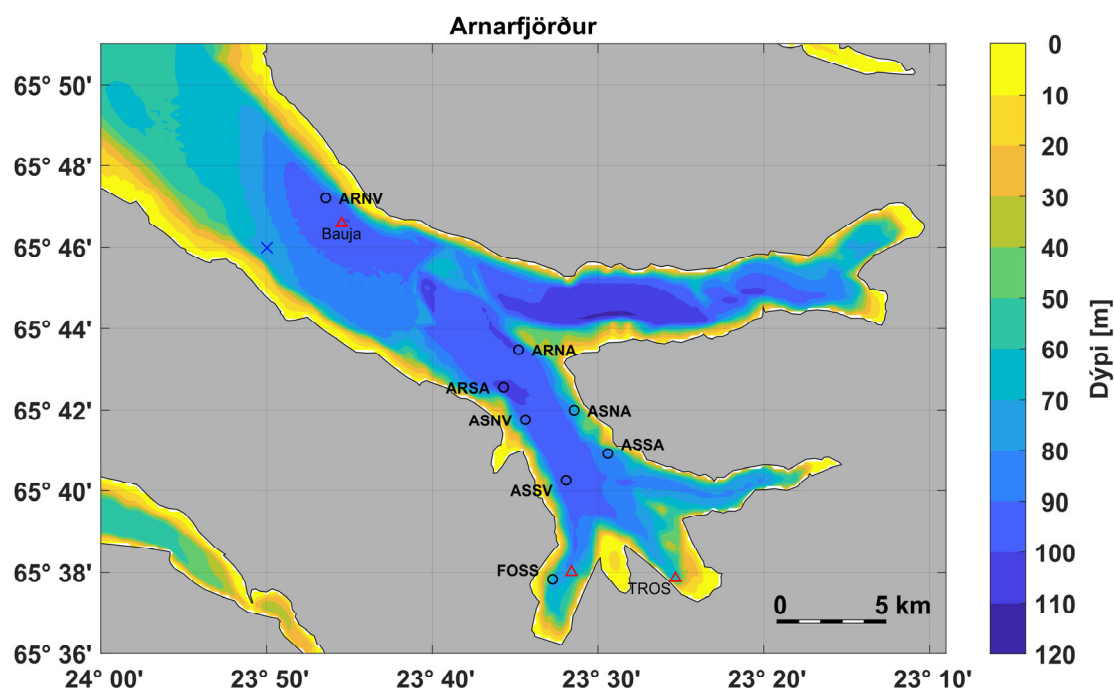
Tækin eru kvörðuð reglulega og niðurstöður bornar saman við niðurstöður frá mælingum með sondu og súrefnisstyrkur var borinn saman við mældan súrefnisstyrk í sýni (Winkler aðferð),

en það má gera ráð fyrir að nákvæmni á súrefnismælingum sé $\pm 0,1 \text{ mL L}^{-1}$. Nákvæmni á hitamælingar er um $\pm 0,003 \text{ }^{\circ}\text{C}$, en á seltu um $\pm 0,05 \text{ psu}$ (Sea-Bird, 2018).

Yfirlit straumlagna í Arnarfirði 2010 – 2021

Árið 2014-2015 voru settar út fjórar lagnir í Suðurfjörðunum, en 2015 fjórar lagnir í Arnarfirðinum fyrir utan Langanes. Mælunum var komið fyrir þannig að samtímis væri greint innflæði og útlæði í firðinum sem og hve langt inn eftir firðinum innflæðið nær og fá þannig góða mynd af hringrás vatns í Arnarfirði. Auk þessa eru notuð gögn frá öðrum mælingum sem voru gerðar á vegum eldisfyrirtækisins Fjarðarlax árin 2010/11 og 2015/16 í Fossfirði og í Trostansfirði. Staðsetningar allra lagnanna má sjá á mynd 4, en hnit og dagsetningar mælinga eru skráð í töflu 3. Skammstafanir fyrir heiti lagnanna byggja á kerfi sem tengir staðsetningar lagnanna og nafn fjarðarins, t.d. merkir „ARNA“ Arnarfjörður Norð-Austur.

Einnig voru gerðar straummælingar á árunum 2005 – 2006, bæði norðanmegin (staðsetning skammt frá „ARNV“, mynd 4) og sunnanmegin (skammt frá ARSV-lögninni, merkt x á mynd 4) í utanverðum Arnarfirði, en niðurstöðum úr þeim mælingum er lýst í Steingrímur Jónsson (2006). Eldri straummælingum við Langanes á árinu 2001 er lýst í Jóhannes Briem (2002).



4. mynd. Kort með staðsetningum allra straumlagna í Arnarfirði árin 2010 – 2020 (svartar hringir). Rauðir þríhyrningar merkja staðsetningar lagna án straumslár, þ.e. rauntímabauju og lagnirnar í Fossfirði og Trostansfirði. Svart x merkir ARSV lögnina sem týndist; nálægt þessum stað var einnig mælt á árunum 2005 – 2006 (Steingrímur Jónsson, 2006).

Figure 4: Positions of all current meter moorings in Arnarfjörður from 2010 – 2020 (black circles). Red triangles indicates the position of moorings without ADCP, i.e. the real time buoy, and moorings in Fossfjörður and Trostansfjörður. Black x marks the ARSV mooring that was lost; close to this place, observations were made in 2005 – 2006 (Steingrímur Jónsson, 2006).

Tafla 3. Straumlagnir í Arnarfirði 2010 – 2020. „AS“-lagnir eru í Suðurfjörðum, „AR“-lagnir í utanverðum Arnarfirði, en „SV“, „SA“, „NA“ og „NV“ tákna „Suðvestur“, „Suðaustur“ o.s.frv. Staðsetningar lagna má sjá á mynd 4.

Table 3: Current meter moorings in Arnarfjörður 2010 – 2020. „AS“ moorings were located in Suðurfirðir, and „AR“ moorings in outer Arnarfjörður. „SV“ refers to south west, „SA“ south east, „NA“ north east, and „NV“ north west, respectively. For locations, see figure 4.

Heiti	Staðsetning	Botn-dýpi	Tímabil mælinga	Mælitæki og dýpi þeirra	Athugasemdir
Fossfjörður 2010 – 2011					
FOSS 2011	65° 37,822' N 23° 32,734' V	70 m	14. des. 2010 – 1. feb. 2011	300kHz-ADCP @ 65 m	Mælt á vegum Fjarðarlax
Suðurfirðir 2014 – 2015					
ASNV	65° 41,760' N 23° 34,380' V	85 m	16. ágú. 2014 – 13. feb. 2015	SBE37-ODO @ 79 m 300kHz-ADCP @ 80 m	færðist á 87 m dýpi 22. sept.
ASSV	65° 40,260' N 23° 31,920' V	89 m	16. ágú. 2014 – 13. feb. 2015	600kHz-ADCP @ 69 m SBE37-ODO @ 84 m	
ASSA	65° 40,920' N 23° 29,400' V	92 m	16. ágú. 2014 – 13. feb. 2015	600kHz-ADCP @ 72 m SBE37-ODO @ 87 m	
ASNA	65° 42,000' N 23° 31,440' V	85 m	16. ágú. 2014 – 13. feb. 2015	SBE37-ODO @ 79 m 300kHz-ADCP @ 80 m	
Arnarfjörður ytri 2015 – 2016					
ARSV	65° 45,990' N 23° 49,970' V	71 m	13. feb. 2015 – týnt	600kHz-ADCP @ 51 m SBE37-ODO @ 66 m	fannst að hluta, en ekki tækin
ARSA	65° 42,554' N 23° 35,698' V	101 m	13. feb. 2015 – 19. jan. 2016	SBE37-ODO @ 95 m 300kHz-ADCP @ 96 m	
ARNA	65° 43,478' N 23° 34,798' V	102 m	13. feb. 2015 – 19. jan. 2016	SBE37-ODO @ 96 m 300kHz-ADCP @ 97 m	
ARNV	65° 47,220' N 23° 46,430' V	96 m	13. feb. 2015 – 20. okt. 2015	600kHz-ADCP @ 76 m SBE37-ODO @ 91 m	súrefnismælingum hætt 6. jún. 2015
Fossfjörður + Trostansfjörður 2015 – 2016					
FOSS	65° 38,000' N 23° 31,600' V	74 m	5. sep. 2015 – 4. jan. 2016	SBE37-ODO @ 73 m (78 m eftir 2. des.)	Fjarðarlax / Arctic Sea Farm
TROS	65° 37,850' N 23° 25,320' V	69 m	5. sep. 2015 – 31. jan. 2016	SBE37-ODO @ 68 m	Fjarðarlax / Arctic Sea Farm
Arnarfjörður ytri 2017 – 2018					
ARNV 2018	65° 47,20' N 23° 46,38' V	99 m	19. maí 2017 – 12. feb. 2018	SBE37ODO @ 95 m (94 m eftir 13. okt.)	lögn með yfirborðsbelg

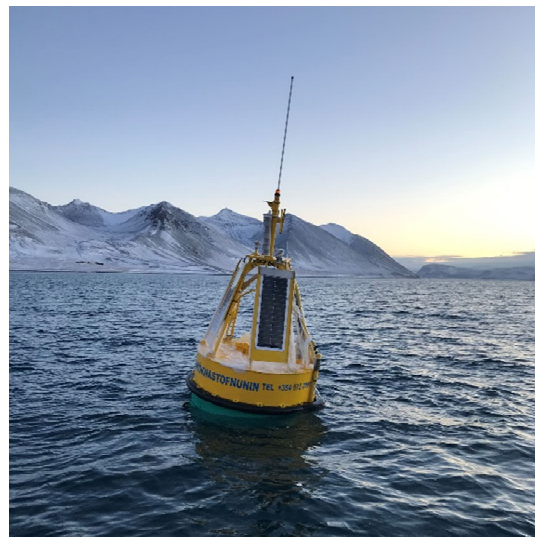
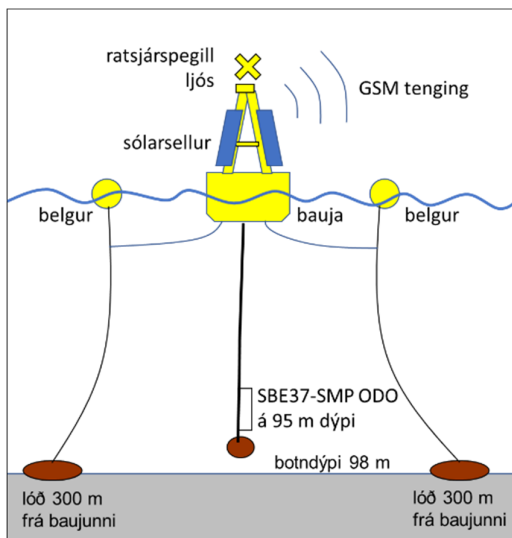
Vöktunarbauja með rauntímamiðlun gagna

Til þess að geta fylgst með hita, seltu og súrefnisstyrk í botnlaginu í rauntíma var bauja með rauntímamiðlun gagna komið fyrir í Arnarfirði árið 2018.

Sú bauja var hönnuð og smíðuð í starfsstöð Hafrannsóknastofnunar á Ísafirði (mynd 5). Baujunni var komið fyrir í norðanverðum Arnarfirði (sjá staðsetningu á mynd 2 og nánari upplýsingar um staðhætti, sjá töflu 4). Á 93 m dýpi, aðeins um 7 m yfir botni er Sea-Bird SBE37-ODO mælitæki, sem mælir hita, seltu, þrýsting og súrefni. Mæligögnunum er miðlað um kapal til tölvubúnaðar á baujunni. Auk þess er hitamælir við yfirborð sjávar og annar sem mælir lofthita. Baujan sendir svo mæligögnin í land.

Öryggisbúnaður samanstendur af ljósi og ratsjárspogli og er staðsetning baujunnar tilkynnt til Landhelgisgæslu og miðlað í AIS kerfi (AtoN).

Skipt var um búnað árið 2020 og sett út bauja af gerðinni OSIL Tern¹, með sítengingu við mælitækið við botn.



5. mynd. Vöktunarbauja í Arnarfirði. Til vinstri: Skýringarmynd af uppsetningu. Til hægri: Bauja 1 í Arnarfirði, 18. janúar 2019. (Ljós. Hjalte Karlsson).

Figure 5: Monitoring buoy with real time data transmission in Arnarfjörður. Left panel: Schematic drawing of buoy setup. Right panel: Buoy 1 in Arnarfjörður, 18 Jan. 2019. (Photo: Hjalte Karlsson).

Tafla 4. Vöktunarbaujur með rauntímamiðlun gagna í Arnarfirði 2018 – 2021.

Table 4: Monitoring buoys with real time data transmission in Arnarfjörður 2018 – 2021.

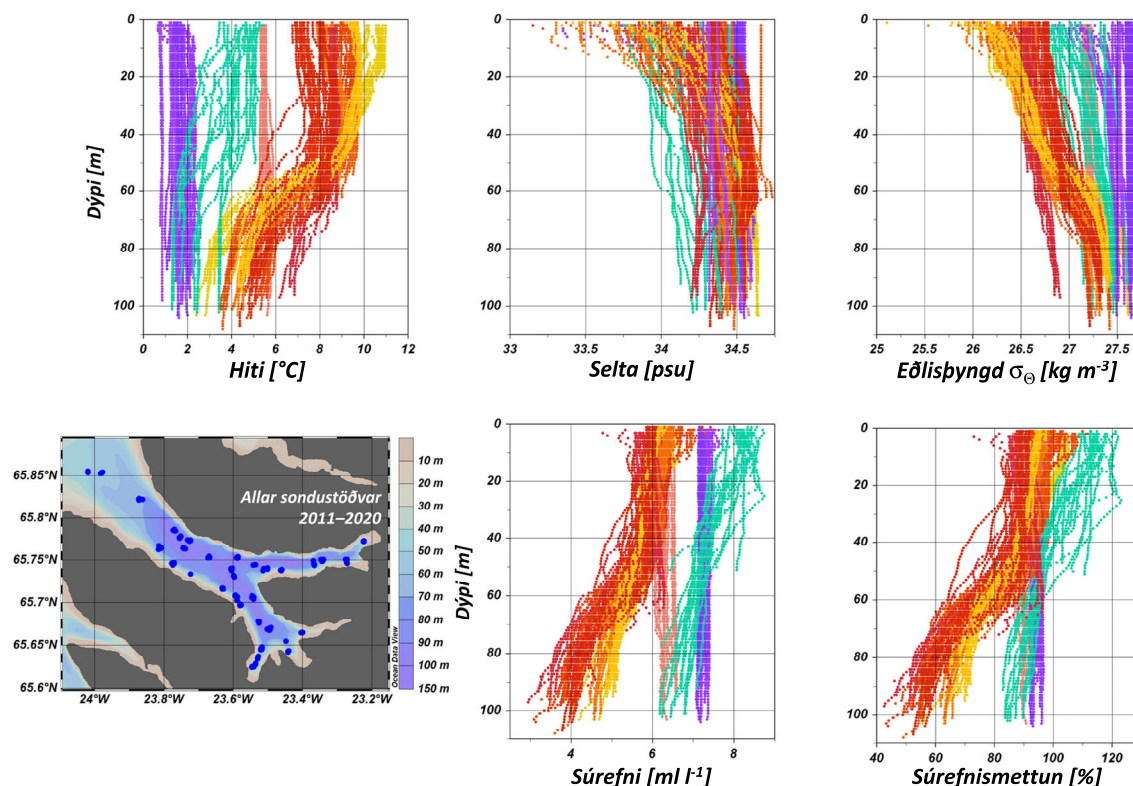
Heiti	Hnit [GPS]	Botn-dýpi	Frá – til	Mælitæki og dýpi þeirra	Athugasemdir
Bauja 1 Hafró- bauja	65° 46,578' N 23° 45,548' V	100 m	10. ágú. 2018 – 27. sep. 2020	lofthiti hiti á yfirborði SBE37-ODO @ 93 m	mælingum hætt 15. sep. 2020
Bauja 2 OSIL-bauja	65° 46,605' N 23° 45,356' V	100 m	27. sep. 2020 – í sjó	SBE37-ODO @ 93 m	mælingum hætt 13. nóv. 2020

¹ OSIL Tern bauja, <https://osil.com/product/osil-1-2m-coastal-tern-monitoring-buoy/> (skoðað 2.7.2021)

Niðurstöður

Ástand sjávar í Arnarfirði

Hiti og selta í Arnarfirði breytast með árstíma og ferskvatnsflæði. Á sumrin er fjörðurinn frekar lagskiptur, en vatnssúlan er blönduð á veturnar. Mynd 6 sýnir niðurstöður mælinga á hita, seltu, eðlisþyngd, súrefnisstyrk og útreiknaðri súrefnismettun frá alls 199 mælingum þar sem sonduprófíll var fenginn á árunum 2012 – 2020 en mælingarnar voru gerðar á öllum árstímum.



6. mynd. Prófílar frá yfirborði til botns frá 199 sondustöðvum í Arnarfirði frá árunum 2013 – 2020. Ferlarnir sýna hitastig (°C), seltu, eðlisþyngd ($\text{kg m}^{-3} - 1000$), súrefnisstyrkur (mL L^{-1}) og súrefnismettun (%). Kortið sýnir staðsetningar stöðvanna. Litir ferla miðast við árstíma: febrúar (fjólubláir), maí (blágrænir), ágúst (gulir), október (rauðir) og nóvember (bleikir).

Figure 6: Hydrographic data from Arnarfjörður, showing 199 CTD profiles from surface to bottom from 2013 – 2020. The panels show temperature (°C), salinity, potential density ($\text{kg m}^{-3} - 1000$), oxygen (mL L^{-1}) and oxygen saturation (%). Colors denote time of the year, from violet (February), blue-green (May), yellow (August) to red (October) and pink (November). Profile locations shown on the map.

Á veturna (febrúar, fjólubláu ferlarnir) er hiti um 1 – 2 °C allt frá yfirborði til botns, selta um 34,45 – 34,55, og eðlisþyngd (sigma-theta) um 27,5 – 27,7 kg m^{-3} . Súrefnismettun er almennt um 95 %, sem bendir til að fjörðurinn sé vel blandaður. Í sumum leiðöngnum, t.d. í febrúar 2015, mældist þó ferskt yfirborðslag (selta um 33,85 á yfirborði) sem myndast vegna ferskvatnsflæði frá landi í stillum þegar lítil blöndun er í sjónum vegna vinda.

Um vorið (maí, blágrænu ferlarnir) er lagskipting að myndast: Efstu 50 m eru farnir að hlýna í 2 – 4 °C, og eðlisþyngdarmunur hefur aukist. Selta minnkar vegna aukins ferskvatnsrennslis til sjávar vegna snjóbráðunar og minni blöndunar. Súrefnismettun í efstu 30 – 40 m hefur aukist í allt að 120 % vegna vorblóma svifþörunga, en í botnlagi fyrir neðan 60 m dýpi fer súrefnið lækkanði sem bendir til að botnlag sé einangrað nú þegar.

Á sumrin (ágúst, gulu ferlarnir) má greina þrjú lög í firðinum: Hiti í efstu 10 – 20 m er allt að 10 – 12 °C, en á milli 20 – 60 m dýpis er hann um 8 – 10 °C, svipað og strandsjór fyrir utan fjarðarmynnið. Hlýnun í botnlagi er hins vegar lítil, hiti er um 2,5 – 4,0 °C, þ.e. aðeins um 1 – 2 °C hlýrra en í febrúar. Selta í botnlagi hefur ekki breyst mikið, en efri lögin eru seltuminni. Á sumum stöðvum, oftast innarlega í firðinum, var mælt mjög grunnt yfirborðslag með seltu um 33,65 í efstu 5 – 10 m vegna ferskvatnsflæðis frá landi. Súrefni heldur áfram að lækka í botnlagi, súrefnisstyrkur í ágúst er um 4,4 mL L⁻¹ (mettun um 60 %).

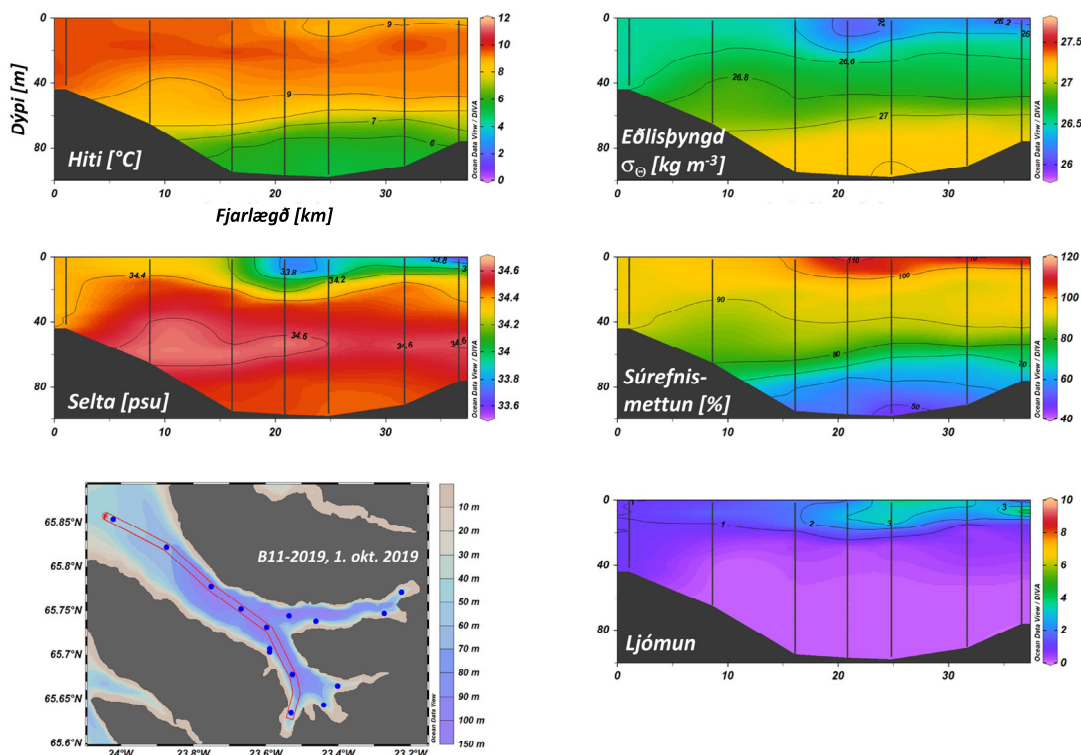
Um haustið (september – október, rauðu ferlarnir) fer yfirborðið að kólna, og hiti í efstu 50 m er mjög einsleitur eða um 9 – 7 °C. Þetta bendir til blöndunar milli yfirborðs- og millilags, þar sem eðlisþyngd við yfirborð hefur aukist við að sjórinn kólnar, auk þess má gera ráð fyrir meira iðustreymi vegna sterkari vinda í haustlæðum. Botnlagið fyrir neðan 60 m er hins vegar ennþá aðskilið, hiti er um 3,5 – 7 °C, þ.e. hærri en í ágúst, en súrefni hefur lækkað enn frekar; súrefnisstyrkur er um 3 – 4 mL L⁻¹ (40 – 60 % mettun).

Í nóvember (bleiku ferlarnir) er alblöndun komin, með nærri sama hita og seltu allt frá yfirborði til botns. Eðlisþyngd er nánast eins í allri vatnssúlunni, sem auðveldar endurnýjun botnlags með lóðréttu blöndun og innstreymi. Súrefnisstyrkur er hár (um 6,2 – 6,6 mL L⁻¹, > 90% mettun) í öllum firðinum.

Í gögnunum sést að það er einhver breytileiki á þessum stærðum á milli ára, en þessi þættir – alblöndun á veturna, lagskipting á sumrin og minnkandi súrefnisstyrkur fram eftir haustinu – eru einkennandi fyrir ástand sjávar í Arnarfirði.

Fyrir utan árstíðabreytingar má greina breytingar í hita, seltu og súrefnisstyrk frá einu svæði fjarðarins til annars. Mælingar á sniði langs eftir firðinum að haustlagi, mælt þ. 1. október 2019, frá Fossfirði og út eftir Arnarfirði má sjá á mynd 7. Þó ástand sjávar sé breytilegt á milli ára eru helstu einkenni dæmigerð fyrir Arnarfjörð á haustin áður en endurnýjun botnlags fer fram. Það má sjá að yfirborðs- og millilag niður á 60 m dýpi er tiltölulega hlýtt. Selta er hæst í miðlagi sem bendir til að innstreymi sé mest á þessum dýpi. Ferskt yfirborðslag er mest áberandi í Arnarfirði fyrir utan Langanes (við „20 km“ merkið), og innst í Fossfirði. Lagskiptinguna má rekja til ferskvatnsflæðis í Borgarfjörð annars vegar og í Suðurfirði hins vegar. Ferskvatns-blandaður sjór er eðlisléttari og myndar þunnt yfirborðslag við skjólgóðar

aðstæður, en hverfur við fjarðarmynni þar sem straumar og blöndun eru meiri. Botnlag fyrir neðan 60 m dýpi er kaldast (um 6 °C) og með meiri eðlisþyngd. Súrefnismettun er um 50 % í botnlaginu, mun lægri en fyrir ofan þröskuldsdýpi.

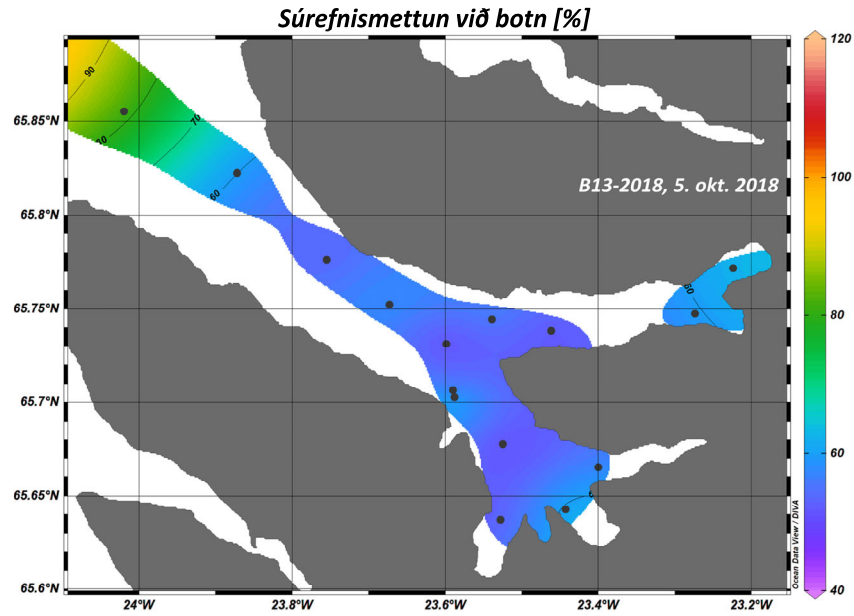


7. mynd. Sondusnið frá utanverðum Arnarfirði (til vinstri) inn í Fossfjörð (til hægri) að haustlagi, þ. 1. október 2019 í leiðangri B11-2019. Myndir sýna hitastig (°C), seltu, eðlisþyngd (kg m^{-3} -1000), súrefnismettun (%) og ljómun.

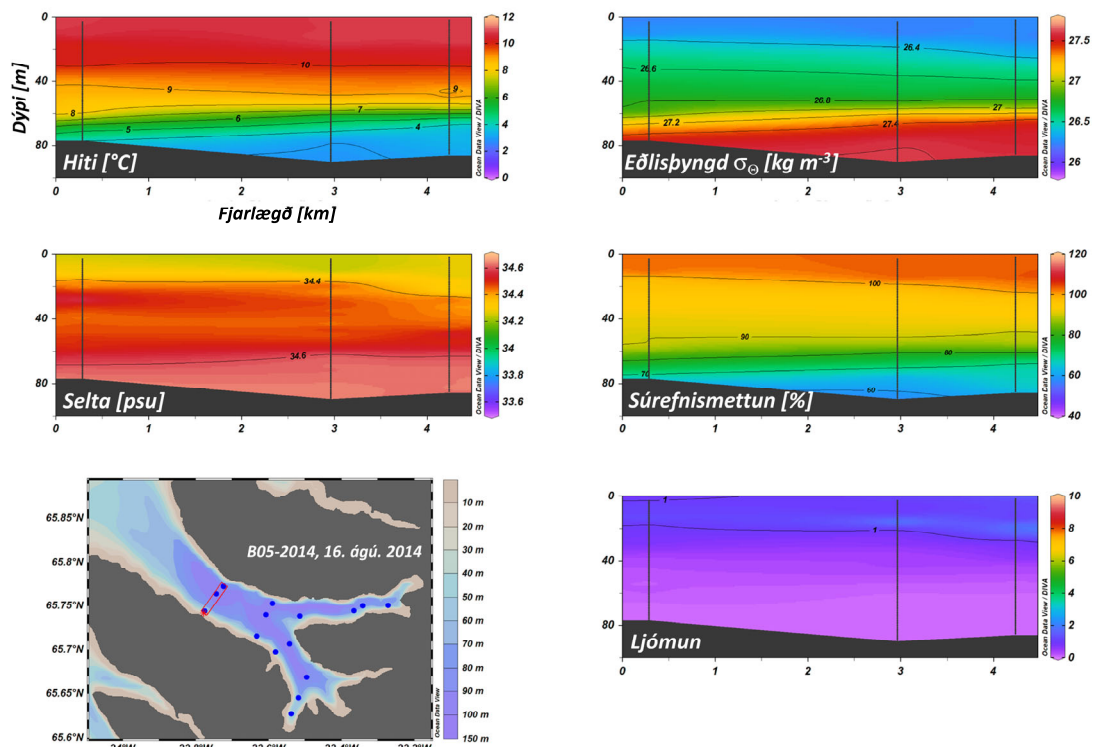
Figure 7: Hydrographic section from outer Arnarfjörður to Fossfjörður (right) in fall conditions, taken 1 October 2019 on the B11-2019 cruise. Figures show temperature, salinity, density, oxygen saturation and fluorescence.

Engar vísbendingar eru um að súrefnismettun við botn sé minni fyrir innan þverhryggina í firðinum. Dæmi frá október 2018 (mynd 8) sýnir súrefnismettun um 51 – 55 % í dýpstu kvosum fjarðarins, en enginn munur er á milli stöðva í Arnarfirði við Hlaðsbót, í holu í Borgarfirði norðan við Langanes (dýpi 113 m), og í Suðurfjörðum, þó hryggir eins og Hvesta (mynd 1) séu á milli þessara staða. Því virðist sem áhrif hryggja í firðinum, fyrir innan megin þröskuldinn, á vatnsskiptin í botnlaginu séu frekar lítil og botnlag má því skilgreina sem einn samfelldan vatnsmassa.

Sondusnið þvert yfir fjörðinn við Hringsdal að sumarlagi (mynd 9) sýnir þrjú aðskilin lög með dýpi, eins og búast má við. Greinilegt er að ferska yfirborðslagið nær dýpra norðanmegin, en hins vegar er selta hærri í miðlagi á 20 – 60 m dýpi sunnanmegin. Þetta mynstur bendir til að ferskt útstreymi úr firðinum sé helst norðanmegin, en innstreymi helst sunnanmegin, þ.e. að straumar fylgi ströndinni sunnanmegin á leið inn fjörðinn.



8. mynd. Súrefnismettun (%) við botn þ. 5. október 2018, B13-2018. Mælistöðvar eru merktar með svörtum doppum.
Figure 8: Oxygen saturation at the bottom on 5 Oct. 2018 on B13-2018. CTD stations marked with black dots.



9. mynd. Sondusnið þvert yfir Arnarfjörð frá Hringsdal í suðri (til vinstri) til Hlaðsbótar í norðri (til hægri) að sumarlagi, mælt þ. 16. ágúst 2014 á B05-2014. Myndir sýna hitastig (°C), seltu, eðlisþyngd (kg m^{-3} -1000), súrefnismettun (%) og ljómun.
Figure 9: Hydrographic section across Arnarfjörður from Hringsdalur (south, to the left) to Hlaðsbót (north, to the right) in summer conditions, taken 16 August 2014 on the B05-2014 cruise. Figures show temperature, salinity, density, oxygen saturation and fluorescence.

Hiti, selta og súrefnisstyrkur í botnlagi

Mælingar á eðliseiginleikum sjávar frá skipum hafa farið fram 2 – 3 sinnum á ári, en ástand sjávar er sífellt að breytast. Mælingar með siritandi tækjum til að fá samfellda gagnaröð með tíma til að geta greint strauma, lækkun súrefnis og endurnýjun í botnlagi.

Ástand sjávar (hiti, selta, eðlisþyngd og súrefnisstyrkur) í botnlagi var mælt með míkroköttum á straumlögnum árin 2010 – 2011 og frá 2014 til 2020. Mælitækin voru yfirleitt í botnlagi á 79 til 100 m dýpi, nema að mælar voru á grynri stöðum í Fossfirði (73 m) og Trostansfirði (68 m). Tímaraðir áranna 2014 – 2020 má sjá á myndum 10 og 11, sem og frá öllum lögnum fyrir sig í viðauka (myndir A1- A14).

Grunnmynstur árstíðabreytinga er svipað á milli ára og óháð staðsetningu í utanverðum Arnarfirði og í Suðurfjörðum. Þróun ástands sjávar í botnlagi með tíma má greina í þremur fösom (myndir 10 og 11):

1) Vetur (nóvember/desember – mars/apríl)

Á veturna kólnar botnlag í Arnarfirði stöðugt frá hámarkshita í nóvember (um 6 – 8 °C) niður að lágmarkshita (0,8 – 1,2 °C) í mars, þó það mælist oft snöggar breytingar um allt að $\pm 0,5$ °C. Selta er einnig sveiflukennd og fer ýmis hækkandi eða lækkandi, en eðlisþyngd er hins vegar sífellt að hækka. Við upphaf vetrartímabils fer súrefnismettun snögglega (á innan við einum degi) frá um 40 % upp í 90 %, og helst súrefnisstyrkur í botnlaginu hár allan veturinn.

Athuganir benda því til að allt botnlagið sé endurnýjað skyndilega í byrjun vetrar, oftast í nóvember, en svo er botnlagið endurnýjað reglulega um veturinn þegar annaðhvort eðlisþyngri sjór streymir inn yfir þröskuldinn, eða yfirborðslag í firðinum kólnar, með tilsvarende aukningu í eðlisþyngd, það mikið að lóðrétt blöndun nær niður í botnlagið. Eiginleikar Atlantssjávar og strandsjávar fyrir utan fjarðarmynnið breytist milli ára (Sólveig R. Ólafsdóttir o.fl., 2020), sem endurspeglast í hita og seltu í Arnarfirði.

2) Vor og sumar (maí – ágúst)

Hiti við botn er lægstur í febrúar / mars, en að loknum vetrarumhleyppingum eða í apríl kemur fremur rólegt tímabil í maí og fram í júlí / ágúst þar sem ástand botnlags er mun stöðugra. Botnlagið hlýnar smám saman eða um 0,2 °C mánuð⁻¹, en selta lækkar um 0,02 mánuð⁻¹, og eðlisþyngd minnkar um 0,04 kg m⁻³ mánuð⁻¹. Súrefnisstyrkur minnkar stöðugt frá um 7 mL L⁻¹ (90 % metnun) í byrjun maí, en meðal-lækkunarhraði er um 0,67 – 0,75 mL L⁻¹ á mánuði.

Allt þetta bendir til að botnlagið sé einangrað að mestu leyti. Hlýnun og seltulækkun má rekja til takmarkaðrar blöndunar við efri lögina sem eru bæði hlýrri og seltuminni, en blöndunin er ekki nægilega sterk að uppfylla við súrefnisþörfina vegna niðurbrots lífrænna efna. Óvenjulega

hröð lækkun á súrefnisstyrk varð í júlí 2017 og í júlí 2019 (allt að $2,0 \text{ mL L}^{-1}$), en hiti og eðlisþyngd breyttust óvenjulega lítið á þessum tveimur mánuðum sem getur verið vísbending um frekar róleg skilyrði með lítilli blöndun og takmarkaðri endurnýjun botnlags.

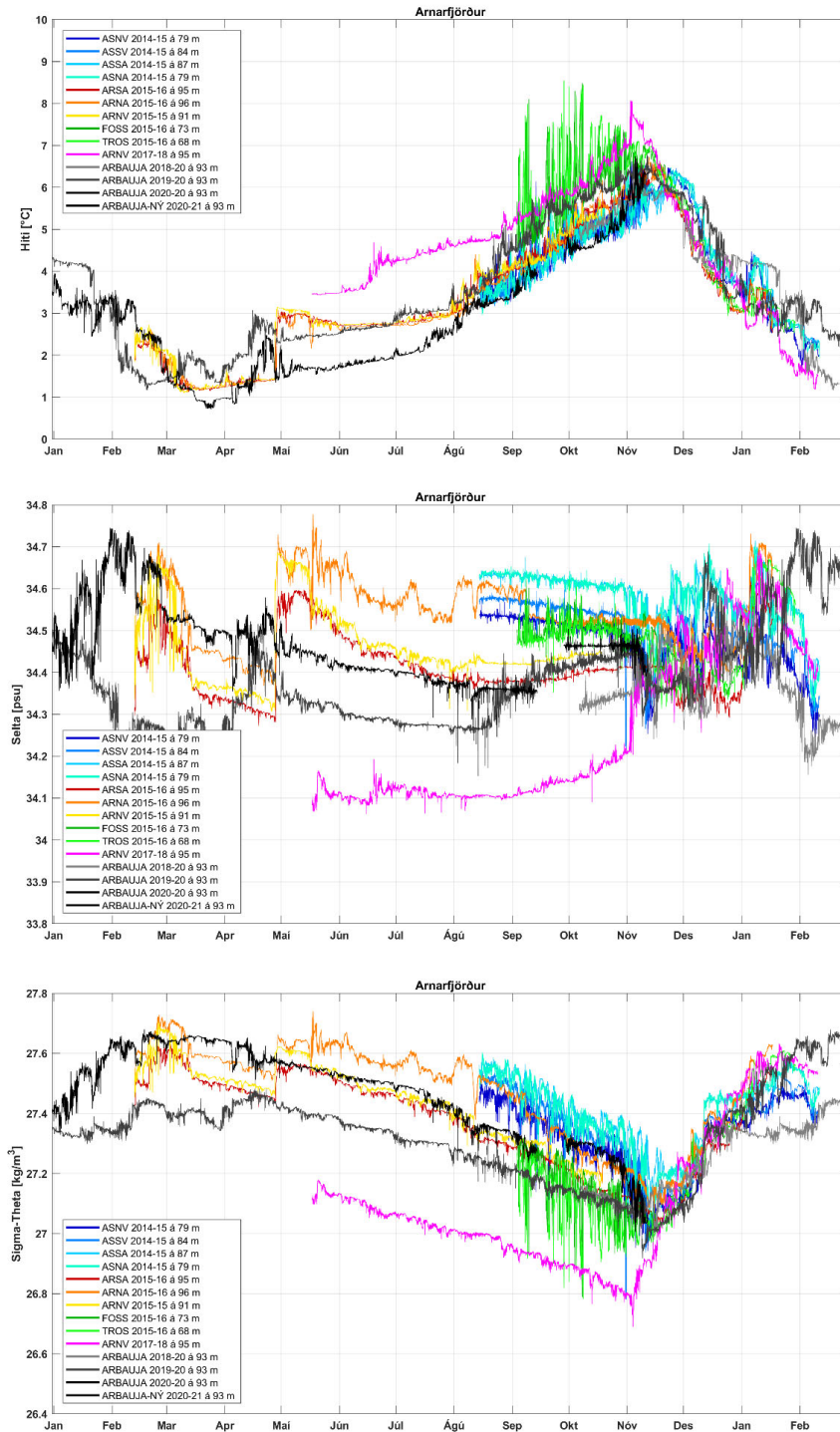
3) Síðsumar og haust (ágúst – október)

Botnlag heldur áfram að hlýna, en skammtímasveiflur hafa nú aukist til muna og eru allt að $\pm 1^\circ\text{C}$. Mælingar á grynri stöðvum í Fossfirði og Trostansfirði sýndu jafnvel allt að $\pm 3^\circ\text{C}$ breytingar, en þeir mælar voru við efri mörk botnlags, þannig að sveiflur á dýpi hitaskila gætu komið við sögu. Mesti hiti í botnlaginu, um $6 - 8^\circ\text{C}$, er yfirleitt mældur í byrjun nóvember, fyrir vetrarblöndun. Selta hélt áfram að minnka fram eftir hausti árið 2014, en í flestum árum hækkar selta síðsumars og á haustin.

Athyglisvert er að þrátt fyrir skammtímaþreyingar á hita og seltu, er minnkun á eðlisþyngd nánast línuleg og á sama hraða og á vorin. Súrefnisstyrkur minnkar enn á þessum árstíma, en mælingar sýna að sjór með meira súrefni blandast inn í botnlagið í auknum mæli á þessum árstíma, sérstaklega á árunum 2014, 2017, 2018 og 2019. Súrefnisstyrkur minnkar í allt að $2,4 - 4,0 \text{ mL L}^{-1}$ (mettun 35 – 55 %), en súrefnisstyrkur er lægstur í október eða byrjun nóvember áður en botnlag er endurnýjað að fullu.

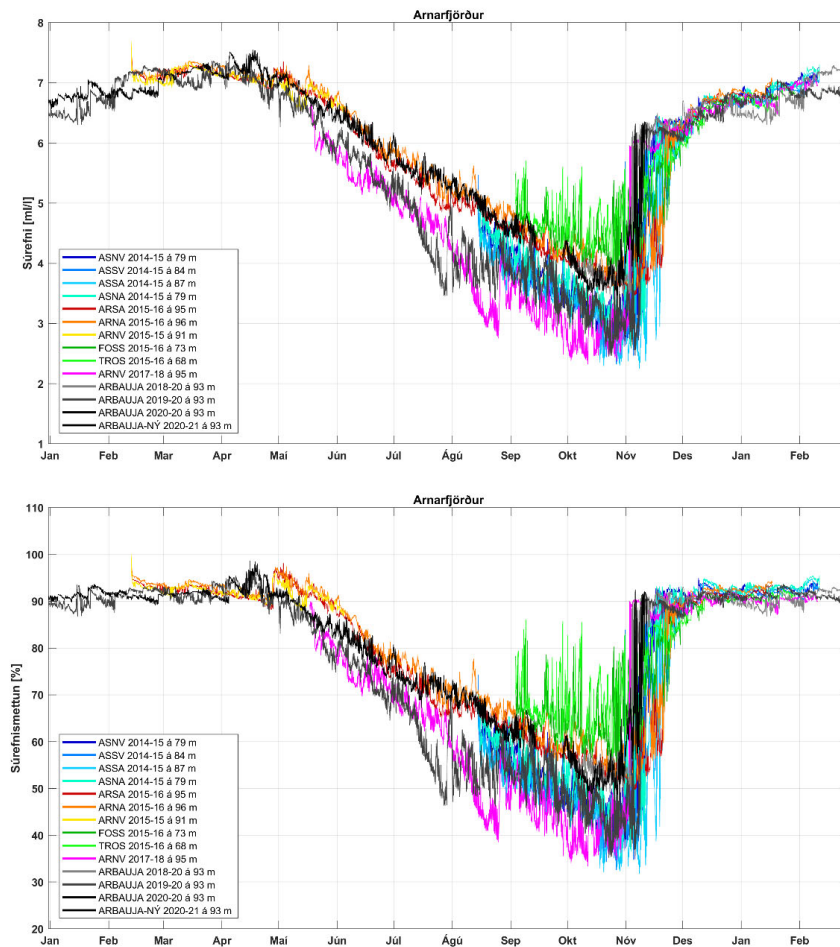
Sú endurnýjun gerist mjög snögglega, oftast á tilteknum degi í nóvember. Einkennandi við endurnýjunina er að súrefnisstyrkur í botnlagi hækkar skyndilega um helming, frá lágmarksgildi ($2,4 - 4,0 \text{ mL L}^{-1}$) upp að $6,0 - 6,4 \text{ mL L}^{-1}$ (30-60 % mettun að 90 % mettun). Eðlisþyngd lækkar skyndilega um $0,1 \text{ kg m}^{-3}$ og nær eðlisþyngd botnlags lágmarki skömmu eftir endurnýjunina. Í flestum árum lækkar eðlisþyngd vegna minni seltu, en 2017 gerðist það hins vegar vegna hærri hita. Endurnýjunin tekur um 1 – 2 daga á flestum stöðum, en innarlega í firðinum (Suðurfirðir við ASSA og ASSV lagnirnar, sem og í Trostans- og Fossfirði) tekur endurnýjunin lengri tíma allt að 2 vikur. Vetrarástand náðist almennt í byrjun desember.

Nánar verður farið í hita-, seltu- og súrefnismælingar í samhengi við straummælingar í næsta kafla, sérstaklega við athugun stakra atburða á haustin þar sem botnlagið endurnýjast að hluta, og svo algjörri endurnýjun í nóvember.



10. mynd. Mælingar á hita ($^{\circ}\text{C}$), seltu og eðlisþyngd ($\text{kg m}^{-3} - 1000$) við botn í Arnarfirði árin 2014 – 2020. Bláir ferlar eru frá Suðurfjörðunum 2014-2015 (ASNV, ASSV, ASSA, ASNA), rauðu og gulu ferlarnir frá Arnarfirði utan við Langanes 2015-2016 (ARSA, ARNA, ARNV), grænir ferlar frá Fossfirði og Trostansfirði 2015-2016 (FOSS, TROS), og fjólubláu ferlarnir eru frá Arnarfirði utanverðri 2017-2018 (ARNV). Gráir og svartir ferlar sýna gögn frá mælibaumum á sama stað síðan 2018. Staðsetningar á lögnum má sjá á mynd 4.

Figure 10: Timeseries of temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity and density ($\text{kg m}^{-3} - 1000$) at the bottom of Arnarfjörður years 2014 – 2020. Blue curves show moorings in Suðurfirðir 2014-2015 (ASNV, ASSV, ASSA, ASNA), red and yellow curves outer Arnarfjörður 2015-16 (ARSA, ARNA, ARNV), green curves are from Fossfjörður and Trostansfjörður 2015-16, and purple curves are from the outer fjord at ARNV 2017-18. Grey and black curves show data from the buoys on the same place since 2018.



11. mynd. Mælingar á súrefnisstyrk (mL L^{-1}) og súrefnismettun (%) við botn í Arnarfirði árin 2014–2020. Bláir ferlar eru frá Suðurfjörðunum 2014 – 2015 (ASNV, ASSV, ASSA, ASNA), rauðu og gulu ferlarnir frá Arnarfirði utan við Langanes 2015–2016 (ARSA, ARNA, ARNV), grænir ferlar frá Fossfirði og Trostansfirði 2015–2016 (FOSS, TROS), og fjólubláu ferlarnir eru frá Arnarfirði utanverðri 2017–2018 (ARNV). Gráir og svartir ferlar sýna gögn frá mælibaumum á sama stað síðan 2018. Staðsetningar á lögnum má sjá á mynd 4.

Figure 11: Timeseries of oxygen concentration (mL L^{-1}) and oxygen saturation (%) at the bottom of Arnarfjörður years 2014 – 2020. Blue curves show moorings in Suðurfjörðir 2014–2015 (ASNV, ASSV, ASSA, ASNA), red and yellow curves outer Arnarfjörður 2015–16 (ARSA, ARNA, ARNV), green curves are from Fossfjörður and Trostansfjörður 2015–16, and purple curves are from the outer fjord at ARNV 2017–18. Grey and black curves show data from the buoys on the same place since 2018.

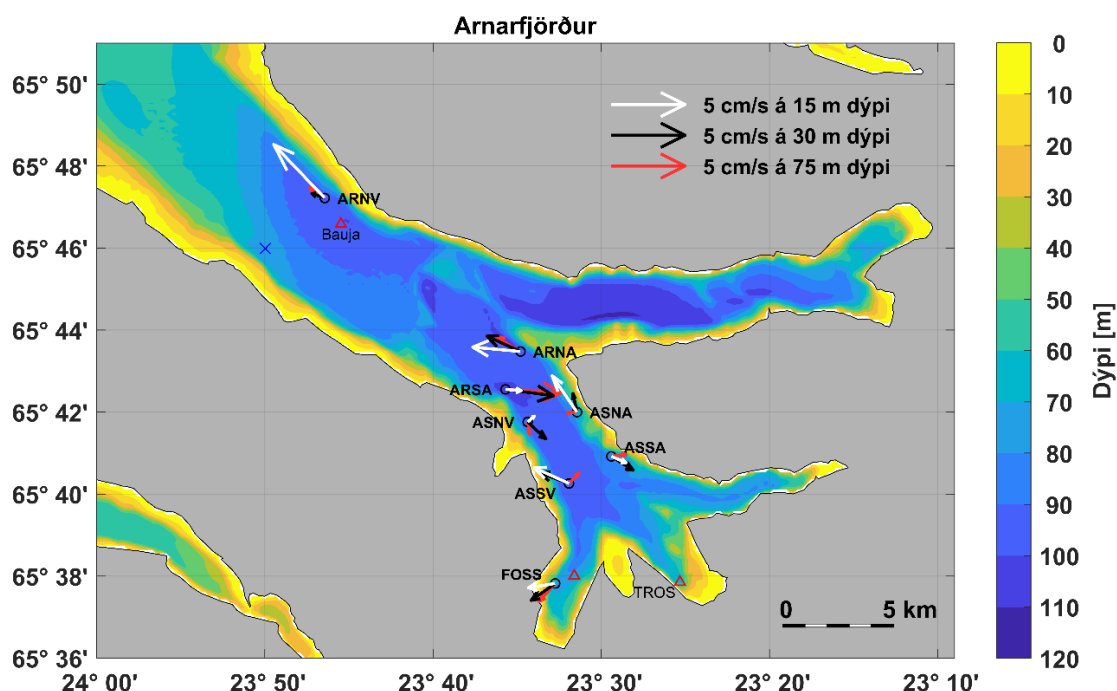
Straumar og vatnsskipti

Straumar í Arnarfirði voru mældir með straumsjám á átta stöðum (mynd 12), bæði í utanverðum firðinum og í Suðurfjörðum, til þess að skoða meðalstraum, skammtíma-breytingar og sjávarfallastrauma (mynd 13 – 18, og A1 – A14).

Meðalstraumur

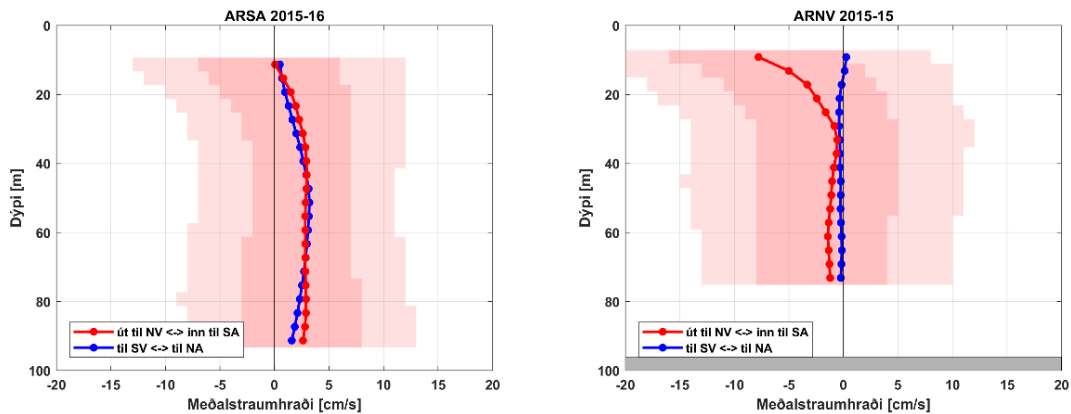
Straummælingar sýna að innstreymi í Arnarfjörðinn er sunnanmegin, en útstreymi norðanmegin (mynd 12), þ.e. strandlína er alltaf „hægra megin“ þegar horft er í straumátt. Í utanverðum Arnarfirði er mesta innstreymi sunnanmegin við ARSA í mið- og botnlagi (svört og rauð ör við ARSA í mynd 12). Meðalstraumhraði í innstreymi mælist allt að 3 cm s^{-1} á 40 – 60 m dýpi (mynd 13), þó skammtímasveiflur séu stundum stærri. Í utanverðum firðinum virðist innstreymi sunnanmegin vera enn meira; þó að lögnin ARSV (staðsetning merkt með „x“ á mynd 12) hafi týnst, sýna eldri mælingar sem gerðar voru á árunum 2005 – 2006 nálægt þessum stað, að meðalstraumur þar sé $3,7 \text{ cm s}^{-1}$ til suðausturs (Steingrímur Jónsson, 2006).

Útstreymi mælist hins vegar norðanmegin við ASNA, ARNA og ARNV en er sterkast við yfirborð (mynd 12, hvítar örvar). Mesta útstreymið mældist við ARNV (Arnarfjörður ytri norðvestur) á 0 – 20 m dýpi, og er meðalstraumur þar allt að 8 cm s^{-1} til norðvesturs á 10 m dýpi (mynd 13).



12. mynd. Kort af Arnarfirði. Staðsetning straumlagna frá 2010 – 2020 og mældur meðalstraumur. Hvítar örvar sýna meðalstraum á 15 m dýpi, svartar örvar á 30 m dýpi, og rauðar örvar á 75 m dýpi. Botndýpi er sýnt með 10 m litabilum og byggist á fjölgeislamælingum.

Figure 12: Arnarfjörður and positions of current meter moorings 2010 – 2020. White arrows indicate mean current at 15 m depth, black arrows at 30 m, and red arrows at 75 m depth. Bathymetry based on multibeam surveys shown with 10 m color intervals.



13. mynd. Meðalstraumprófílar í utanverðum Arnarfirði, við ARSA (sunnanmegin, innstreymi) og ARNV (norðanmegin, útstreymi) árin 2015 – 2016. Línur sýna meðalstraum, en doppur á línunum tákna upplausn straumsjármælinga með 4 m dýptarbilum. Bláar línur sýna straum til norðausturs (þvert yfir fjörðinn), en rauðar línur sýna straum með ströndinni til suðausturs (innstreymi, jákvæð gildi) eða útstreymi til norðvesturs (neikvæð gildi). Bleiku svæðin sýna breytileika straumsins langs með firðinum (80 % og 95 % allra mælinga).

Figure 13: Current observations in outer Arnarfjörður at moorings ARSA (south side, inflow) and ARNV (north side, outflow). Heavy lines show mean current profile, with dots indicating the 4 m vertical resolution of the ADCP data. Blue lines indicate mean current across the fjord (positive values to northeast). Red lines show mean current along the fjord (positive values to southeast=inflow, negative values to northwest=outflow). Shaded areas shows along-fjord current variability (80 % and 95 % percentile).

Í Suðurfjörðum eru straumar veikari og er straumkerfið flóknara, sérstaklega innan við Bíldudal. Við ASNV fyrir utan við Bíldudal mælist innstreymi allt að $2,5 \text{ cm s}^{-1}$ á 20 – 30 m dýpi (mynd 12, og A2). Hinum megin, við Steinanes (ASSA) og Langanes (ASNA) er útstreymi greinilegt í yfirborðslaginu í efstu 20 m (meðalstraumur til norðvesturs allt að 5 cm s^{-1} á 10 m dýpi; mynd 12 og A4, A5).

Mælingar innar í firðinum, við Haganes og í Fossfirði, sýna hins vegar veikari strauma í mismunandi áttir eftir staðsetningu og dýpi (mynd 12, og A1, A3). Við Haganes (ASSV) snýr meðalstraumur oftast að landi á 0 – 40 m dýpi, en vísbendingar eru um veikt móttstreymi í botnlagi. Innst í Fossfirði mældist enn minni straumur, en meginstefnan er í SV-átt.

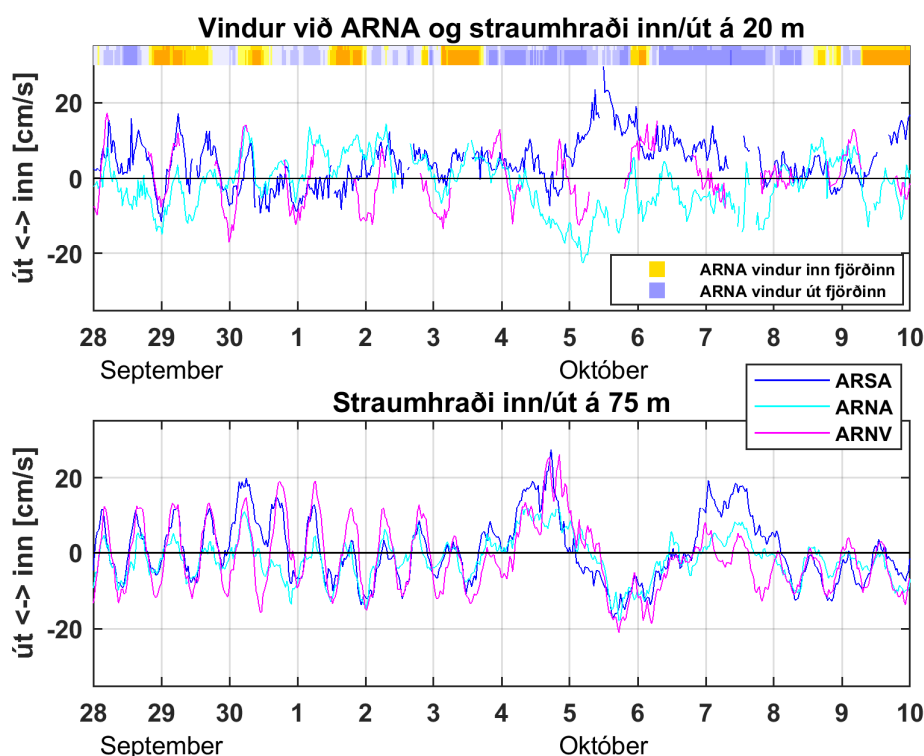
Straumkerfið í utanverðum firðinum má útskýra með áhrifum snúningsjarðar (Coriolis-kraftur) sem beinir hafstraumum á norðurhveli jarðar til hægri. Það má búast við að áhrif Coriolis-krafta séu greinileg í stærri fjörðum sem eru nokkrir km að breidd (Tómas Zoëga, 2016). Innstreymi sunnanmegin og útstreymi norðanmegin í Arnarfirði passa vel í þessa mynd þar sem Arnarfjörður er stór og um 6 km breiður fjörður.

Mesta útstreymið mældist utarlega í firðinum við ARNV, en jafnvel við Langanes (ARNA, ASNA) og Steinanes (ASSA) í Suðurfjörðum er útstreymi greinilegt í efstu 20 m sjávarins, sem er eðlislétt yfirborðslag vegna ferskvatnsblöndunar frá landi; aukið útstreymi norðanmegin kemur heim og saman við meira ferskvatn norðanmegin í firðinum (mynd 9).

Sjávarfallastraumar

Sjávarfallahæð í Arnarfirði eru frá um 1,2 m (smástreymi) til allt að 3,7 m í stórstreymi, eins og mældist á þrýstingsmælum á straumlögnunum (engin mynd). Sjávarfallastraumar í Arnarfirði eru frekar einsleitir um allan fjörðinn og eru oftast innan við 5 cm s^{-1} , en utarlega í firðinum við ARNV lögnina geta þeir verið allt að 15 cm s^{-1} . Einkennandi er þó að sjávarfallastraumar eru missterkir með tíma og eru stundum illgreinanlegir, þar sem áhrif vinda geta verið meiri. Dæmi má sjá á mynd 14, þar sem sjávarfallastraumar við ARNA-lögnina á 20 m dýpi eru greinilegir til 1. október 2015 (í botnlagi til 4. október), en hverfa alveg á tímabilinu 4. – 8. október þegar vindur blæs út fjörðinn og straumkerfi breytist með ákveðið innstreymi sunnanmegin (ARSA) og útstreymi norðanmegin (ARNA og ARNV).

Mælingar sýna að sjávarfallastraumar eru yfirleitt á sama fasa og styrk bæði sunnanmegin og norðanmegin í firðinum, og að færsla vatns fram og til baka er yfirleitt innan við 2 km miðað við aðfall og útfall.



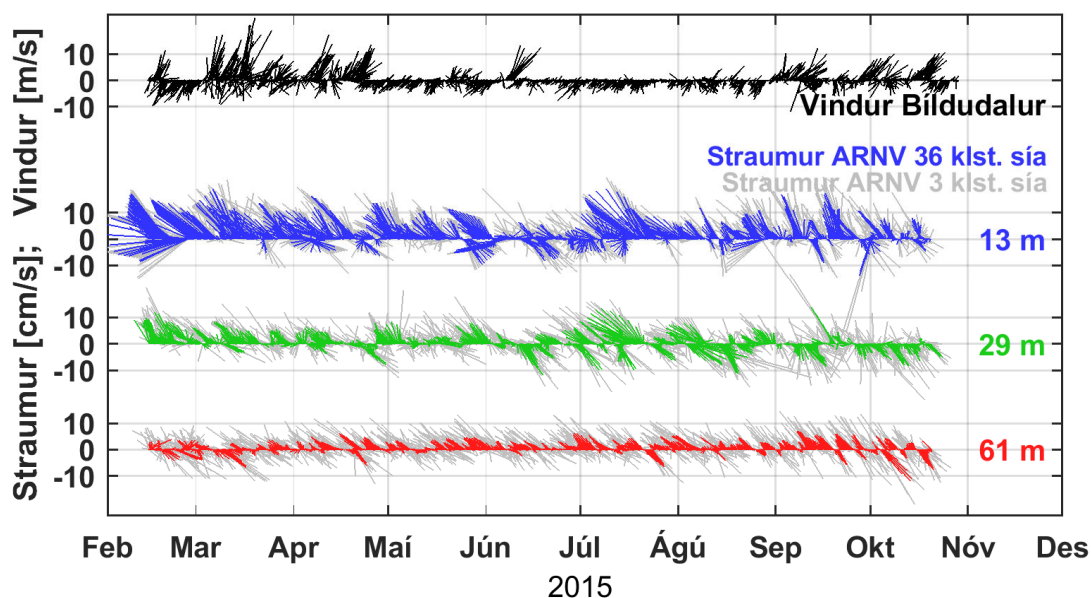
14. mynd. Vindur og straummælingar í Arnarfirði, dæmið sýnir 12 daga í september – október 2015. Efst: Straumhraði með ströndinni á 20 m dýpi sunnanmegin við ARSA (blátt), og norðanmegin við ARNA (ljósblátt) og ARNV (fjólublátt). Jákvæð gildi þýða innstreymi, neikvæð gildi útstreymi. Litaskalinn efst sýnir straumsjárgögn frá yfirborði við ARNA, gul/rauð merkir að vindur blæs inn fjörðinn, en blár út fjörðinn. Dekkri litir tákna meiri vindhraða. Neðst: Straummælingar á 75 m dýpi.

Figure 14: Wind and current observations in Arnarfjörður, shown are 12 days in Sept. – Oct. 2015. Top panel: Current observations at ARSA, ARNA and ARNV at 20 m depth, inflow with positive values, and outflow negative. The colored bar on the top shows ADCP surface bin data from ARNA. Red and yellow indicates wind blowing into the fjord, blue shows wind blowing out of the fjord. Darker colors indicate higher wind speeds. Bottom panel: Current observations at 75 m depth.

Breytileiki í straumum og vindafar

Þó meðalstraumar séu í samræmi við hina „klassísku“ hringrás í firðinum, eru straumar mjög breytilegir með tíma og á milli staða. Breytileiki er mest áberandi á veturna og haustin. Mesti straumhraði mældist yfirleitt við yfirborð, sem bendir til að áhrif vinda séu mikil, eins og sjá má við ARNV lögnina (mynd 15; myndir frá hinum lögnum finnast í viðauka A1-A8).

Við ARNV lögnina, norðanmegin utarlega í firðinum, er mesta útstreymi til norðvesturs við yfirborð allt að 30 cm s^{-1} , en straumar breytast mikið frá degi til dags, og geta jafnvel snúist í öfuga átt. Á sumrin (maí – september) er straumhraði yfirleitt minni en á veturna. Einnig á 27 m dýpi má greina miklar sveiflur í straumátt og straumhraða, þó straumar séu yfirleitt hægari en við yfirborðið. Í botnlagi er straumhraði enn minni, en útstreymið til norðvesturs er stöðugra, sérstaklega á sumrin.



15. mynd. Straumur febrúar – nóvember 2015 við ARNV, norðanmegin utarlega í Arnarfirði, og vindmælingar á Bíldudal. Straumvektorar á 13 m (blár), 29 m (grænn) og 67 m dýpi (rauður), án sjávarfallastrauma (36 klst. lágtíðnisía). Svartir vektorar sýna vindmælingar á Bíldudal.

Figure 15: Current vectors at ARNV mooring in outer Arnarfjörður (north side), Feb. – Nov. 2015, at 11, 27 and 67 m depth, without tidal currents (36 hours low-pass filter).

Breytingar á yfirborðsstraumum tengjast að hluta til áhrifum vinda. Norðaustanáttir eru algengar á Vestfjörðum, en í Arnarfirði eru austanáttir (þ.e. vindur blæs út fjörðinn) ríkjandi vindátt (vindatlas Veðurstofunnar, 2021²). Næsta veðurathugunarstöð Veðurstofunnar er á Bíldudal³, og er greinilegt að veðurfar er vindasamara á veturna. Ekki er þó hægt að tengja

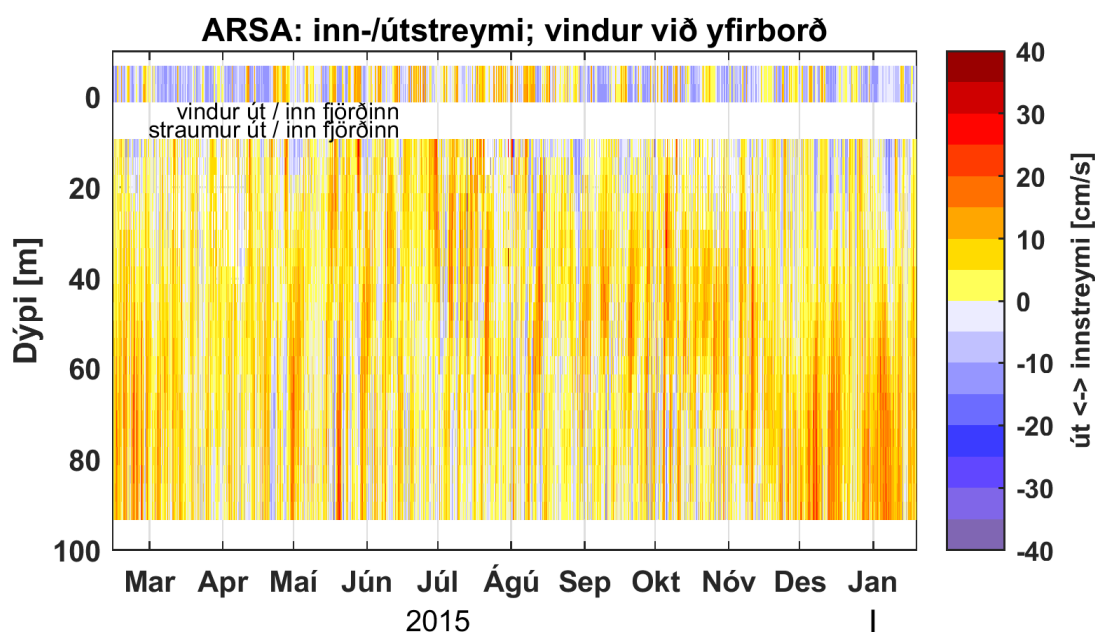
² Vindatlas Veðurstofunnar, <https://vindatlas.vedur.is/#>, skoðað 30.4.2021.

³ Sjálfvirk veðurathugunarstöð nr. 2428 á Bíldudal, gögn 1998 – 2021 fengin frá Halldóri Björnssyni hjá Veðurstofunni, 3.2.2021.

breytingar á yfirborðsstraumum við ARNV beint við vindmælingar, þar sem vindmælirinn á Bíldudal er í skjóli fjalla í vissum áttum.

Hins vegar gefa straumsjárgögn frá yfirborði vísbendingar um vindátt og vindstyrk (Marmorino og Hallock, 2001) úti á firðinum. Mælingar við ARSA, sunnanmegin í utanverðum Arnarfirði (mynd 16) staðfesta að ríkjandi vindátt er út fjörðinn yfir mestan tíma ársins, en á sumrin (júní – september) greinist einnig hafgola sem blæs inn fjörðinn. Straumgögnin frá sama stað sýna nokkra fylgni á milli vinds og straums í efstu 20 m. Yfirleitt er innflæði ríkjandi straumátt við ARSA (rauðir litir á mynd 16), en stundum mælist útstreymi í efstu 20 m, sérstaklega á veturna þegar vindur blæs út úr firðinum, en þá mælist mótsstreymi (innstreymi) á sama tíma á meiri dýpi.

Það er áberandi að dýpi innstreymis breytist með árstímum (mynd 16) – á sumrin nær það innflæði yfirleitt frá yfirborði niður á allt að 40 – 50 m dýpi. Á haustin færast innflæðið niður á 20 – 60 m dýpi og er jafnvel á móti vindi. Á veturna (lok nóvember – mars) er innflæðið mest í botnlagi (50 – 95 m).



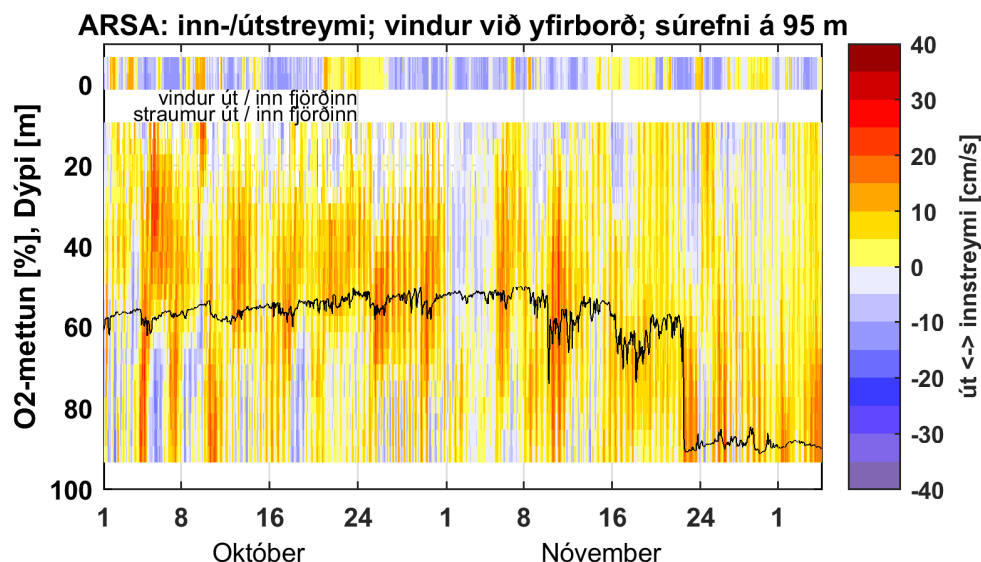
16. mynd. Inn- og útstreymi við ARSA, sunnanmegin í utanverðum Arnarfirði, á árunum 2015-2016. Innstreymi til austurs með gulum og rauðum litum, útstreymi til vesturs með bláum litum. Mesta innstreymi er við 0 – 60 m dýpi á sumrin, en á 60 – 100 m dýpi á veturna. Litaskali efst sýnir straumsjármælingar á yfirborði sem er vísbending um vindátt, bláir litir sýna að vindur blæs út fjörðinn, og rauðir litir að vindur blæs inn fjörðinn (m.a. hafgola á sumrin).

Figure 16: In- and outflow at ARSA, on the south side of outer Arnarfjörður. Inflow (eastward) shown in yellow and red tones, outflow to the west with blue. Note that the core of the inflow (red colors) is in the upper 60 m during summer, but between 60 and 100 m depth in winter. The colorbar on top shows ADCP measurements at the surface, indicating wind blowing into the fjord (red) or out of the fjord (blue).

Endurnýjun að haustlagi

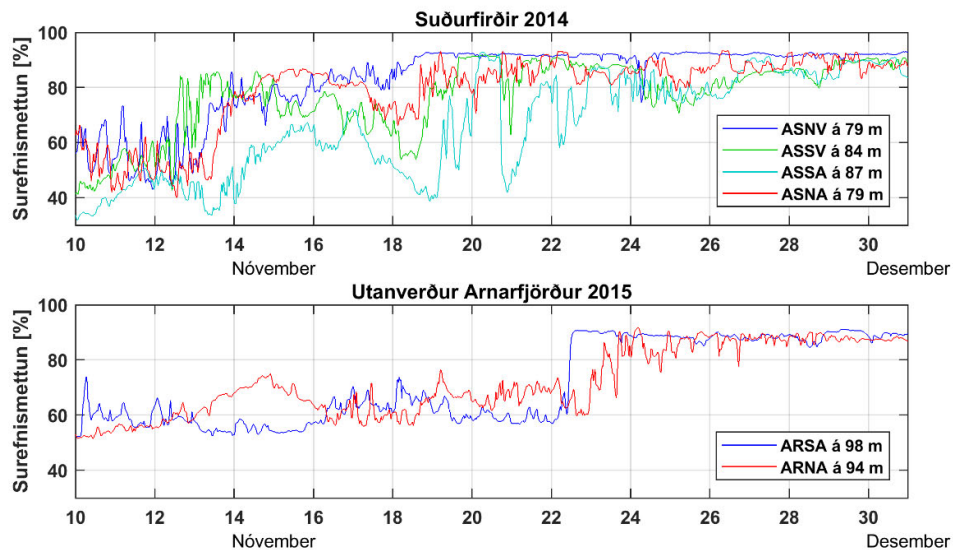
Á haustin er botnlag ekki lengur alveg einangrað, heldur greinist meiri breytileiki í súrefnisstyrk, seltu og hita (myndir 10 og 11). Þegar gögn frá straummælingum frá ARSA-lögninni, sunnanmegin í firðinum (mynd 17) eru skoðuð í samhengi við mælingar á hita, seltu og súrefnisstyrk frá sama stað sést greinilega að slíkar breytingar tengjast innstreymisatburðum (rauðir litir á mynd 17). Snemma á haustin nær mesta innstreymi niður á 60 m dýpi, en innstreymisatburðir ná sífelldu dýpra þegar líður á haustin, og á tilteknum degi, hér þ. 21. nóvember 2015, endurnýjast botnlagið að fullu niður í botn.

Við endurnýjun hækkar súrefnismettun við botn skyndilega frá 60 til 90 %, eins og mælingar sýna (mynd 17). Sú snögga endurnýjun tekur aðeins innan við 6 – 12 klukkustundir á hverjum stað (mynd 18). Á straumlögnnum í utanverðum Arnarfirði árið 2015 mældist snögg hækkun á súrefnisstyrk, ásamt hita- og seltubreytingum, fyrst sunnanmegin við ARSA, en um 16 klst. síðar norðanmegin við ARNA, og það tók svo um 16 klst. til viðbótar uns súrefnisstyrkur í útstreyminu við ARNA var komið í 90 % mettnun. Mælingar í Suðurfjörðum árið 2014 sýna einnig hraða endurnýjun í botnlaginu en þann 12. nóvember 2014 endurnýjaðist sjór fyrst vestanmegin (ASNV, ASSV), en hinum megin þar sem almennt er útstreymi, mældist endurnýjun eigi fyrr en 1 – 2 sólarhringum síðar (við ASNA, og síðast við ASSA innarlega í Suðurfjörðum). Það ár tók það reyndar tvær vikur uns súrefnismettunin náði 90 %; endurnýjunin gerðist síðar við ASSA innarlega í Suðurfjörðum.



17. mynd. Inn- og útstreymi við ARSA, sunnanmegin í utanverðum Arnarfirði, haustið 2015. Innstreymi sýnt með rauðum og gulum litum, útstreymi með bláum litum. Svört lína sýnar mælingar á súrefnismettun á 95 m dýpi (ath. að y-ásinn lækkar upp). Litaskali efst sýnir straumsmælingar á yfirborði sem er vísbending um vindátt, bláir litir sýna að vindur blæs út fjörðinn, og rauðir litir að vindur blæs inn fjörðinn (m.a. hafgola á sumrin).

Figure 17: In- and outflow at ARSA, on the south side of outer Arnarfjörður. Inflow (eastward) shown in yellow and red tones, outflow to the west with blue. Observations of oxygen saturation at 95 m depth shown with black line (note reverse axis direction). The colorbar on top shows ADCP measurements at the surface, indicating wind blowing into the fjord (red) or out of the fjord (blue).



18. mynd. Súrefnismettun við botn við upphaf vetrarblöndunar á haustin 2014 og 2015. Efst frá Suðurfjörðum árið 2014. Blá lína sýnir gögnin frá ASNV lögninni, græn ASSV, ljósblá ASSA (innarlega við Steinanes) og rauð ASNA. Neðst frá utanverðum Arnarfirði árið 2015, blá frá ARSA lögninni sunnanmegin, og rauð frá ARNA við Langanes.

Figure 18: Oxygen saturation at the bottom at the onset of the winter mixing. Upper panel from Suðurfirði in 2014; blue line shows data from ASNV mooring, green ASSV, light blue ASSA (located in inner fjord at Steinanes) and red ASNA. Lower panel from outer Arnarfjörður in 2015; data from ARSA mooring on the south side in blue, and from ARNA at Langanes in red.

Tímamunur á endurnýjuninni á milli staða bendir til þess að endurnýjun byrji með innstreymi strandsjávar yfir þröskuldinn, sá vatnsmassi berst svo sunnan megin eftir firðinum og síðan norðan megin á innan við 1 – 2 dögum, en innarlega í Suðurfjörðum getur full endurnýjun tekið allt að tvær vikur. Dagsetning endurnýjunar er mismunandi eftir árum, en hún gerist yfirleitt í nóvember (tafla 5).

Umræður

Áhrif vinda á strauma

Í grynri fjörðum, eins og Dýrafirði (Tómas Zoëga, 2016) eru áhrif vinda vel greinileg í öllum firðinum, og í Reyðarfirði mældist að vatnsskiptin aukast þegar lægðir ganga yfir á austurmiðum (Hafsteinn G. Guðfinnsson o.fl., 2001). Arnarfjörður er ólíkur þessum tveimur fjörðum þar sem hann er með þröskuld í mynninu, og er því meira lagskiptur og með einangrað botnlag á sumrin. Straumsjármælingar í Arnarfirði sýna að innstreymi í utanverðum Arnarfirði er helst sunnanmegin, og útstreymi norðan megin. Vindur hefur áhrif á þessi grunnmynstur og sérstaklega í efstu 20 m þar sem má búast við að straumar geta snúið í alla áttir. Einnig tengjast

sum innstreymisatvik breytingum á vindi, en fleiri þættir skipta máli hér, m.a. eðlisþyngd sjávar, og staðbundin áhrif fjalla á vindafar.

Mat á endurnýjun yfirborðs- og miðlags

Efri lög Arnarfjarðar, þ.e. yfir þröskuldsdýpi eða 65 m, eru í sífelldum vatnsskiptum og endurnýjun í gegnum fjarðarmynnið allt árið. Endurnýjun er bæði vegna sjávarfalla og inn- og útstreymi sem er þó breytilegt eins og straummælingar sýna. Rúmmál fyrir ofan þröskuldsdýpi er um 14,0 km³, en tími sem þarf til endurnýjunar skiptir máli m.a. við þynningu og dreifingu uppleystra næringaefna frá fiskeldi. Þó straumar séu breytilegir og straummælingar aðeins gerðar á stökum mælipunktum, er hægt að leggja gróft mat á endurnýjunartíma, út frá meðalstraumum, sjávarföllum og reki.

Meðalinnstreymi við ARSA-lögnina er um 2 cm s⁻¹, en meðalútstreymi við ARNV norðanmegin um 1,5 cm s⁻¹. Breidd fjarðarins við ARNV er um 6 km, en ef reiknað er með útstreymi á nyrstu 2 km sniðsins má búast við að meðalstraumar flytji um allt að 2000 m³ s⁻¹. Endurnýjunartími sjávar í yfirborðslögum Arnarfjarðar metinn út frá meðalstraum er því um 80 dagar.

Ef horft er á sjávarföll má áætla að innstreymi á aðfalli sé um 685 millj. m³, því sjávarfallahæð í Arnarfirði er um 2,5 m að meðaltali (engin mynd) og flatarmál fjarðarins um 274 km². Meðalinnstreymi vegna sjávarfalla gæti því verið um 15.000 m³ s⁻¹ og endurnýjunartími vegna sjávarfalla um 11 dagar, en innarlega í firðinum eru sjávarfallastraumar samfelld færsla fram og til baka og áhrif þeirra á endurnýjun væntanlega ofmetin með þessari aðferð.

Straummælingar benda til þess að rek sjávar sé um 2 km á dag. Það gæti því tekið um 40 daga að klára leiðina inn fjörðinn sunnanmegin, og út aftur norðanmegin.

Að öllu þessu samanteknu fæst að raunverulegur endurnýjunartími er líklega um 1 – 2 mánuðir, en það má gera ráð fyrir meiri endurnýjun og styttri endurnýjunartíma í stormum á veturna.

Mat á endurnýjun botnlags að sumarlagi

Botnlag í Arnarfirði er að mestu leyti einangrað á sumrin, en mælingar á hita og seltu við botn benda til stöðugrar, en takmarkaðrar blöndunar frá efri lögum. Sé skoðað tímabilið frá maí – ágúst þar sem mælingar sýna ekkert innstreymi í botnlagið og endurnýjun er sem minnst þá greinist samt þrátt fyrir einangrum botnlagsins stöðug hlýnun í því ásamt minnkandi seltu. Út frá þessum breytingum má meta endurnýjun botnlags að sumarlagi á eftirfarandi hátt.

Rúmmál botnlags fyrir neðan 65 m dýpi er um 3,6 km³, en stöðug hlýnun á sumrin án endurnýjunaratvika er um 0,3 °C mánuð⁻¹ (mynd 10). Ef hitamunur á milli laga er um 4 °C

(botnlag 5 °C, miðlag á 40 m dýpi um 9 °C; sjá sondumælingar á mynd 6), má útskýra hlýnun botnlagsins með blöndun við um $110 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ af hlýrri sjó frá miðlaginu.

Selta í botnlaginu breytist um -0,02 til -0,05 á mánuði frá maí til ágúst. Þó seltuminnkun sé ekki eins einsleit og hlýnunin, má einnig rekja seltubreytingar til blöndunar milli laga, þar sem strandsjór og miðlagið í firðinum eru á sumrin oftast aðeins seltuminni en botnlagið (mynd 9).

Endurnýjun um $110 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ er lítil miðað við rúmmál botnlagsins og án innstreymis að haustlagi væri endurnýjunartími botnlags allt að 12 mánuðir.

Mælingar á eðliseiginleikum sjávar með sondu (CTD) á stöðvum sem dreift var um allan fjörðinn, og straumlagnir í Suðurfjörðum og í utanverðum Arnarfirði, sýna að ástand sjávar í botnlagi er mjög einsleitt milli staða, og breytingar eins og endurnýjunaratvik berast um allan fjörðinn innan fáeinna daga. Það bendir til þess að botnlag í Arnarfirði sé einn samfelldur vatnsmassi og að áhrif þröskulda í firðinum, eins og Hvestu, á strauma og blöndun innan í botnlagi séu lítil.

Endurnýjun og alblöndun í nóvember

Ástand botnlagsins í Arnarfirði á haustin er meira sveiflukennt, og mælingar sýna innstreymisatburði sem tengjast breytingum á hita, seltu og súrefni í botnlagi (myndir 10, 11 og 17). Við hvern atburð hækkar súrefnisstyrkur, og niðurstöður frá straummælingum benda til þess að hér sé um innstreymi strandsjávar að ræða, frekar en lóðrétt blöndun. Einnig geta orðið hita- og seltubreytingar þannig að selta í botnlagi lækkar ekki lengur vegna blöndunar við miðlag, heldur helst stöðug eða jafnvel hækkar í flestum árum, sem gæti tengst aðeins hærri seltu strandsjávar og miðlags á haustin (mynd 9, og A1 – A14).

Hlýnun botnlags að haustlagi (ágúst – nóvember) er hraðari en fyrr á árinu og eðlisþyngd minnkar. Á sama tíma kólna efri lögin, eins og má sjá í baujumælingum 2018 – 2020 (myndir A12-A14). Eðlisþyngdamunur með dýpi minnkar og með aukinni eðlisþyngd strandsjávar nær innstreymið sífellt dýpra (mynd 17). Þegar réttum skilyrðum er náð, nær endurnýjun alveg niður til botns og botnlag í firðinum endurnýjast að fullu. Baujumælingar sýna að á þessum tímamarki er hiti við yfirborð nánast eins og hiti við botn (myndir A12-A14), og eðlisþyngdamunur milli yfirborðs og botns er líklega lítill⁴. Það er áberandi að hiti breytist ekki við endurnýjunina, en selta minnkar um allt að 0,1, og eðlisþyngd minnkar um allt að 0,1 kg m^{-3} (myndir A2-A14). Augljóslega er eðlisþyngd strandsjávar nú nógu mikil að geta endurnýjað

⁴ Engar seltumælingar við yfirborð eru til og því ekki hægt að greina eðlisþyngdamuninn milli laga á degi endurnýjunar.

botnlagið allt niður til botns. Straummælingar (mynd 17) staðfesta að endurnýjunin er fyrst og fremst vegna innflæðis, og tekur ekki meira en 1 – 2 daga að ná um allann fjörðinn.

Lóðrétt blöndun á milli yfirborðs og botns skiptir hér einnig máli, þó sérstaklega síðar á veturna þegar hiti, selta og súrefnistyrkur eru mjög einsleit í vatnssúlunni (mynd 6), en snöggar breytingar í mælingum benda til innstreymis yfir þröskuldinn.

Súrefni í botnlagi að sumar- og haustlagi

Súrefnismettun strandsjávar og miðlags er meira en 80 % allt árið, og má gera ráð fyrir að eitthvað af súrefni blandist niður í botnlagið á sumrin. Þrátt fyrir þetta fer súrefnið í botnlaginu sífellt lækkandi yfir sumar- og haustmánuðina, sem sýnir að endurnýjunin (um $110 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) er það lítil að hún vegur ekki upp á móti þeirri súrefnisþörf sem myndast vegna niðurbrots lífrænna efna á botni fjarðarins.

Lækkun súrefnis í botnlagi í Arnarfirði hefur verið mismikil á milli ára (mynd 11 og tafla 5), eins og má búast við vegna sveiflna í veðurfari, endurnýjun botnlags, breytingum í náttúrulegu kolefnisflæði og álagi frá fiskeldi. Almennt er lækkunin hröðust snemma að sumarlagi (maí – júlí) þar sem fjörðurinn er lagskiptur og endurnýjun botnlags í lágmarki. Þó meðallækkun sé um -0,5 til -0,80 mL L^{-1} á mánuði, hafa komið nokkur styttri tímabil þar sem lækkunin mældist talsvert hraðari, sérstaklega í ágúst 2017 (um -1,5 mL L^{-1} við ARNV, fjórlublár ferill á mynd 11), og í júlí 2018 (-1,8 mL L^{-1} við baujuna, grár ferill á mynd 11). Engar straummælingar liggja fyrir frá þessum árum, en samanburður við minni slík atvik þar sem straummælingar liggja fyrir má gera ráð að vatnsskiptin og straumar hafi verið hægari en vanalega í þessum mánuðum.

Á árunum 2015 og 2020 hélt stöðuga lækkunin áfram fram í október, en í flestum árum (2014, 2017, 2018 og 2019) urðu meiri skammtímasveiflur á tímabilinu frá ágúst – október, og nokkrir minni endurnýjunaratburðir áttu sér stað. Þrátt fyrir þessar sveiflur á haustin getur súrefnisstyrkur farið niður í allt að 2,4 mL L^{-1} (um 35 % mettun). Lágmark um 2,3 – 2,5 mL L^{-1} mældist á árunum 2014 í Suðurfjörðum, og 2017 og 2019 í Arnarfirði, en önnur ár varð lágmarkið um 3,5 mL L^{-1} eða meira.

Lágmarksgildi á súrefnisstyrk í Arnarfirði samkvæmt þessum gögnum er hærra en talið er lífsnauðsynlegt fyrir fiska og aðrar lífverur í sjónum (Buhl-Mortensen o.fl., 2006) Samt skiptir aukning á álagi frá niðurbroti lífrænna efna og tímasetning endurnýjunar að haustlagi miklu máli um hvert lágmark hvers árs verður þar sem endurnýjun botnlags er mjög lítil að sumar- og haustlagi. Á þeim tíma sem fjörðurinn er lagskiptur minnkar súrefnisstyrkur í botnlagi um meira en helming svo að án endurnýjunar í nóvember yrði botnlag í Arnarfirði súrefnisnautt eftir eitt ár.

Tafla 5. Súrefnisstyrkur í botnlagi Arnarfjarðar árin 2014 – 2020: dagsetning þegar endurnýjun að haustlagi er lokið á hverjum stað, dagsetning og lágmarksgildi súrefnisstyrks á hverju ári, og hraði lækkunar súrefnisstyrks á mánuði bæði snemma á sumrin (maí – júlí) og síðsumars / að haustlagi (ágúst – október).

Table 5: Oxygen in the bottom layer of Arnarfjörður, 2014 - 2020: Dates when renewal of the bottom layer is finished for each mooring, date and level of minimum oxygen concentration for each year, and monthly decrease in oxygen levels for early summer (May-July) and late summer / fall (August – October).

Ár	Staðsetning	Endurnýjun lokið (ca.) dagsetning	Lágmark O ₂ mL L ⁻¹ dagsetning	Lækkun dO ₂ /dt mL L ⁻¹ mán ⁻¹
2014	Suðurfirðir ASSV, ASNV, ASNA ASSA	11.11.2014 20.11.2014	2,4 mL L ⁻¹ 2.11.2014	engin gögn (maí-júl) -0,65 (ágú-okt)
2015	Arnarfjörður ARSA ARNA	21.11.2015 22.11.2015	3,5 mL L ⁻¹ 6.11.2014	-0,75 (maí-júl) -0,53 (ágú-okt)
2015	Fossfj./Trostansfj.	24.11.2015	3,8 mL L ⁻¹ 27.10.2015	engin gögn (maí-ágú) -0,50 (sep-okt)
2016				engar mælingar
2017	Arnarfjörður ARNV	3.11.2017	2,3 mL L ⁻¹ 11.10.2017	-0,80 (maí-júl) -0,80 (ágú-sept)
2018	Arnarfjörður ARNV	3.11.2018	3,5 mL L ⁻¹ 31.10.2018	engin gögn (maí-sep) -0,60 (okt)
2019	Arnarfjörður Bauja	8.11.2019	2,5 mL L ⁻¹ 24.10.2019	-0,75 (maí-júl) -0,47 (ágú-okt)
2020	Arnarfjörður Bauja	11.11.2020	3,5 mL L ⁻¹ 28.10.2020	-0,65 (maí-ágú) -0,60 (sep-okt)

Mat á kolefnisflæði til botnlags

Lækkun súrefnisstyrks í botnlagi bendir til að blöndun súrefnismettaðs sjávar frá efri lögum sé ekki nægileg til að bæta upp súrefnisnotkun vegna flæðis lífræns efnis til botnalagins, en endurnýjun að haustlagi kemur í veg fyrir að súrefnissnauðt ástand myndast.

Á sumrin áður en innstreymisatvik eiga sér stað lækkar súrefnisstyrkur í botnlaginu stöðugt um -0,65 til -0,80 mL L⁻¹ á mánuði skv. mælingum (tafla 5). Með því að meta minnkun á heildarmagni súrefnis í botnlaginu, að teknu tilliti til súrefnisflæðis frá efri lögum, er hægt að meta súrefnisþörf í botnlaginu (tafla 6). Súrefnisþörf í botnlagi tengist helst náttúrulegu kolefnisflæði, þ.e. flæði af lífrænum efnum til botn. Ofan á náttúrulegt flæði bætist við álag frá fiskeldi, að mestu leyti fastur úrgangur og fóðurleifar.

Frumframleiðsla í íslenskum fjörðum er há, en athuganir með setgildrum í Arnarfirði og Patreks- og Tálknafirði árið 2014 leiddu í ljós að náttúrulegt kolefnisflæði breytist talsvert eftir staðsetningu frá 60 í allt að 154 g C m⁻² ár⁻¹ (Sólveig R. Ólafsdóttir et al., 2015), eða um 5 til 13 g C m⁻² mánuð⁻¹ að meðaltali.

Tafla 6. Mat á súrefnis- og kolefnisflæði til botnlags.

Table 6: Estimate of oxygen and carbon fluxes in the bottom layer, based on observations.

Forsendur		
Rúmmál botnlags fyrir neðan 65 m	3,6 km ³	
Flatarmál botnlags við 65 m	157,4 km ²	
Blöndun frá efri lögum	110 m ³ s ⁻¹	
Súrefnistyrkur í efri lögum á 50 m dýpi	6,0 mL L ⁻¹	
Umreikna mL L ⁻¹ í mol m ⁻³	1 mL L ⁻¹ O ₂ = 44,661 *10 ⁻³ mol m ⁻³ O ₂	
Mat á kolefnisflæði	á mánuði	á ári
Mæld lækkun súrefnisstyrks í botnlagi	-0,7 mL L ⁻¹ mán ⁻¹	-24,2 *10 ⁸ mol O ₂ ár ⁻¹
Lækkun (heildarmagn í botnlagi)	-1,23 *10 ⁸ mol O ₂ mán ⁻¹	
Innflæði súrefnis (blöndun frá efri lögum)	+0,79 *10 ⁸ mol O ₂ mán ⁻¹	
Lækkun súrefnis án innflæðis (magn)	-2,02 *10 ⁸ mol O ₂ mán ⁻¹	
Lækkun súrefnis án innflæðis (styrkur)	-1,45 *10 ⁸ mL L ⁻¹ mán ⁻¹	
Niðurbrotið kolefni á mánuði [mol]	2,02 *10 ⁸ mol C mán ⁻¹	29.088 tonn C ár ⁻¹ 185 g C m ⁻² ár ⁻¹
Niðurbrotið kolefni á mánuði [tonn]	2.424 tonn C mán ⁻¹	
Kolefnisflæði	15,4 g C m ⁻² mán ⁻¹	

Vegna þessara miklu breytinga getur reynst erfitt að meta meðalkolefnisflæði fyrir allan fjórðinn með beinum mælingum, en blöndunin sem þekkt er milli laga á sumrin gerir kleift að meta kolefnisflæði. Tafla 7 sýnir reiknisdæmi sem byggist á að meðallækkun súrefnis sé um -0,7 mL L⁻¹ á mánuði, sem er meðalgildi frá mælingum í maí – júlí þegar blöndunin er sem minnst.

Með þessum aðferðum má meta kolefnisflæði um 15,4 g C m⁻² á mánuði. Matið er aðeins hærra en mælingar með setgildrum bentu til, en þó af sömu stærðargráðu. Yfir lengra tímabil (maí – október) er meðallækkun á súrefni aðeins minni (um -0,5 mL L⁻¹ mánuð⁻¹) og kolefnisflæði yrði um 11 g C m⁻² mánuð⁻¹. Það þarf þó að taka fram að óvissa við matið er mikil, þar sem flæðið á lífrænum efnum breytist mikið milli staða, með árstímum og milli ára, og skekkja eykst enn frekar með óvissu um stærð og sveiflur á blöndun milli laga og endurnýjun botnlags.

Það má því gera ráð fyrir að náttúrulegt kolefnisflæði í botnlag Arnarfjarðar sé um 60 – 180 g C m⁻² ár⁻¹ (5 – 15 g C m⁻² mánuð⁻¹), eða að um 9.500 til 29.000 tonn af kolefni á ári. Kolefnisflæði og súrefnisþörf eykst með álagi frá fiskeldi, sérstaklega þegar fastur úrgangur lendir í botnlaginu.

Samantekt

Hafrannsóknastofnun gerði umfangsmiklar rannsóknir í Arnarfirði á árum 2010 - 2021, bæði með rannsóknaskipum og með síritandi mælitækjum sem komið var fyrir í firðinum.

Arnarfjörður er dæmigerður þröskuldsfjörður, og mælingar sýna að vatnssúlan er vel blönduð á veturna, en á sumrin og að haustlagi er fjörðurinn lagskiptur. Það er ferskt og létt yfirborðslag á efstu 20 m, og síðan miðlag sem er í sífelldum vatnsskiptum við strandsjó á landgrunninu úti fyrir. Straummælingar sýna að breytileiki strauma er mikill, en mesta innstreymi í Arnarfjörðinn er oftast á miðju dýpi sunnanmegin, en mesta útstreymi norðanmegin við yfirborð, sem má útskýra vegna snúnings jarðar. Í Suðurfjörðum eru straumar almennt veikari og er hringrás ekki eins greinileg.

Botnlag á 65 – 110 m dýpi er hins vegar einangrað frá maí og fram í nóvember; vegna lítillar endurnýjunar lækkar súrefnisstyrkur í allt að $2,3 \text{ mL L}^{-1}$ (33 % mettun) á haustin. Á haustin kólna efri lögin, eðlisþyngdarmunur hverfur og þegar réttum skilyrðum er náð, yfirleitt í nóvember, endurnýjast botnlag að fullu á innan við 1 – 2 dögum.

Þakkarorð

Við viljum þakka áhöfnum skipa fyrir frábært samstarf í rannsóknaleiðöngnum. Við þökkum Halldóri Björnssyni frá Veðurstofunni fyrir að útvega veðurathuganir við Bíldudal. Síðan þökkum við Steingrími Jónssyni frá Háskólanum á Akureyri fyrir yfirlestur þessarar skýrslu.

Heimildir

Andreas Macrander og Héðinn Valdimarsson. (2016). *Endurkastsstyrkur og dægurfar dýrasvífs skoðað með straumsjám í Arnarfirði / Backscatter and diel dynamics of zooplankton observed with ADCP in Arnarfjörður*. Haf- og vatnarannsóknir, HV2016-001, bls. 28 – 33. ISSN 2298-9137, Reykjavík 2016.

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

Buhl-Mortensen, L. Aure, J. Alve, E., Oug, E. & Husum K., 2006. Effects of hypoxia on fjordfauna: The bottomfauna and environment in fjords on the Skagerrak coast [in Norwegian]. *Fisken og Havet* 3:108 p

Hafsteinn G. Guðfinnsson, Héðinn Valdimarsson, Steingrímur Jónsson, Jóhannes Briem, Jón Ólafsson, Sólveig R. Ólafsdóttir, Ástþór Gíslason og Sigmar A. Steingrímsson. (2001). *Rannsóknir á straumum, umhverfisþáttum, og lífríki sjávar í Reyðarfirði frá júlí til október árið 2000*. Hafrannsóknastofnun, Fjölrit 85, 2001.

Jóhannes Briem. (2002). *Straummælingar í Arnarfirði*. Hafrannsóknastofnunin, Reykjavík (óbirt skýrsla).

Marmorino, G.O. and Z.R. Hallock. (2001). On Estimating Wind Velocity Using an Upward-Looking ADCP. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 18, 5, 791 – 798, 2001.
[https://doi.org/10.1175/1520-0426\(2001\)018<0791:OEUVUA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(2001)018<0791:OEUVUA>2.0.CO;2)

Pawlowicz, R., B. Beardsley, and S. Lentz. (2002). Classical Tidal Harmonic Analysis Including Error Estimates in MATLAB using T_TIDE, *Computers and Geosciences*, 28, 929-937 (2002).

Rakel Guðmundsdóttir, Sólveig R. Ólafsdóttir, Hjalti Karlsson og Stefán Áki Ragnarsson. (2020). *Umhverfisáhrif sjókvíaldís - Mælingar á efnaferlum í seti íslenskra fjarða*. Haf- og vatnarannsóknir. HV 2020-42. Hafrannsóknastofnun.

Sea-Bird. (2018). SBE 37-SMP-ODO MicroCAT CT(D)-DO Datasheet. Sea-Bird Scientific, Rev. July 2018. Sótt af <https://www.seabird.com/asset-get.download.jsa?id=54627861945> (Skoðað 17.11.2020).

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

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

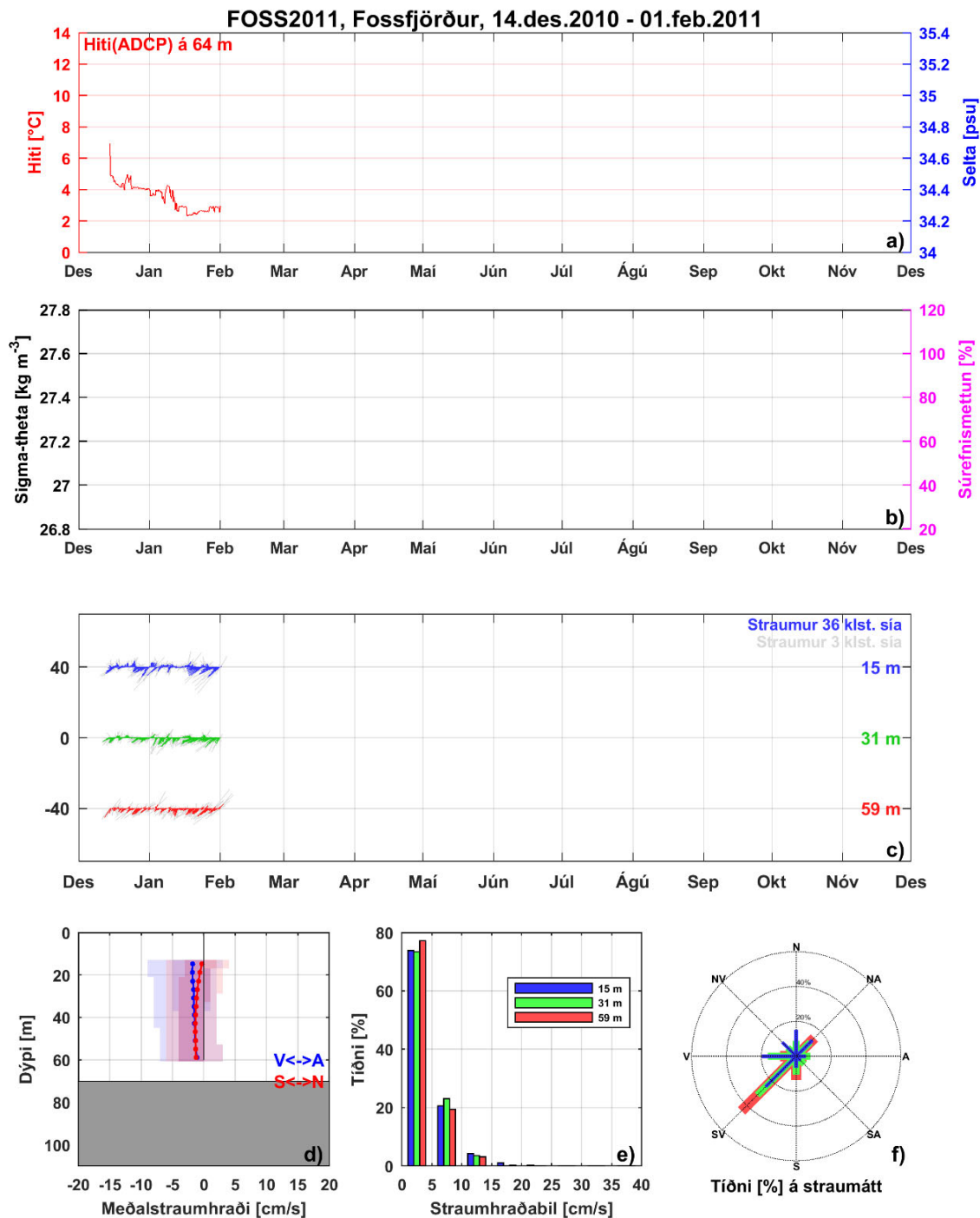
Sólveig R. Ólafsdóttir, Alice Benoit-Cattin og Jón Örn Pálsson. (2015). *Mæling á náttúrulegri ákomu lífræns efnis í Arnarfirði, Patreksfirði og Tálknafirði / Flux of organic matter in Arnarfjörður, Patreksfjörður and Tálknafjörður. Í þættir úr vistfræði sjávar 2014*. Fjölrit Hafrannsóknastofnunarinnar. 2015;181.

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

Teledyne RD Instruments. (2019). Workhorse Sentinel Self-Contained 1200, 600, 300 kHz ADCP. Teledyne RD Instruments, Rev. Aug. 2019. Sótt af http://www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/sentinel_datasheet_lr.pdf (Skoðað 17.11.2020).

Tómas Zoëga. (2016). Samband vinda og strauma í Dýrafirði. B.S. verkefni, Háskóli Íslands, <http://hdl.handle.net/1946/24789>

Viðaukar. Tímaraðir frá öllum mæilögnum í Arnarfirði 2010 – 2021.

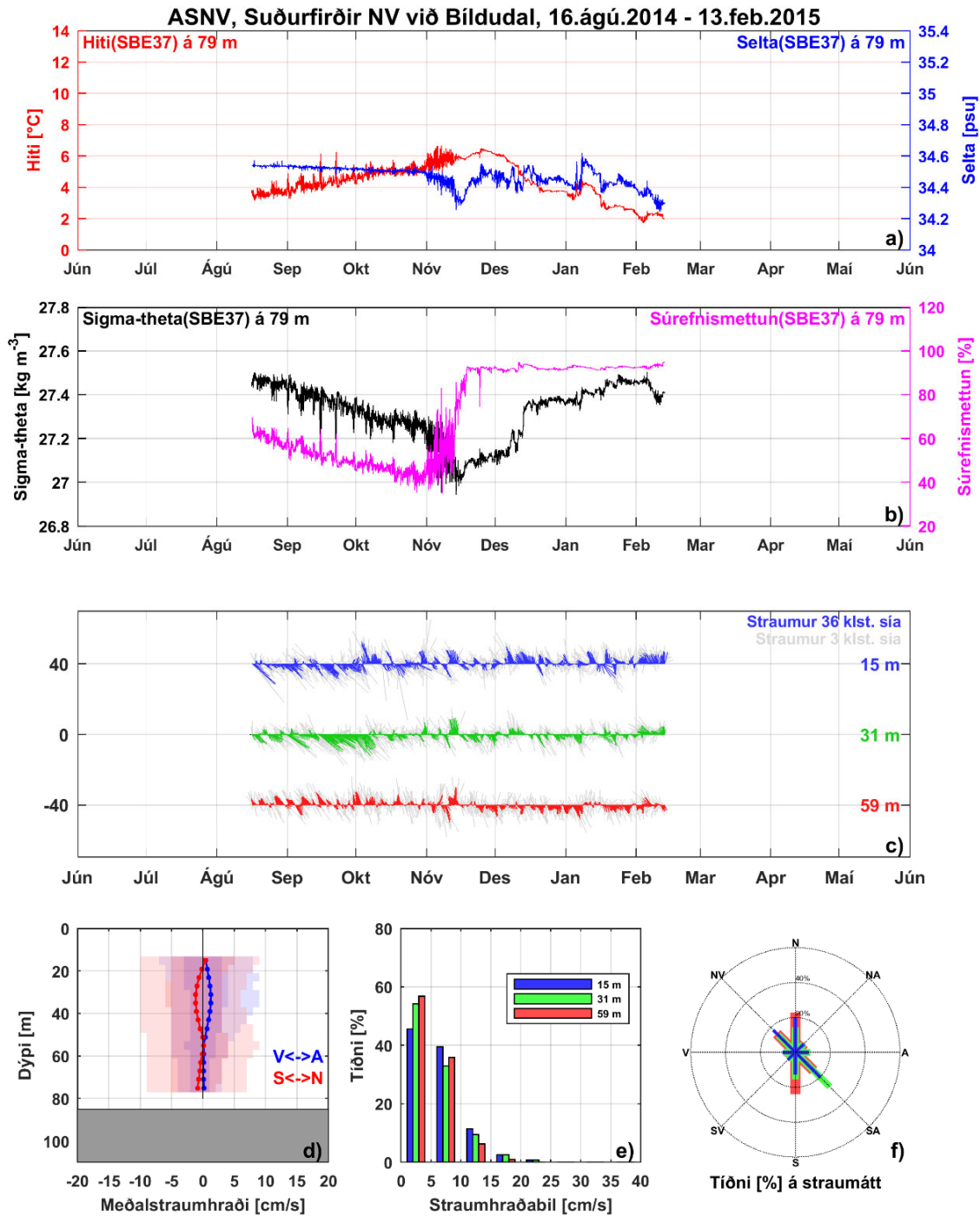


Viðauki 1. Mynd A1. Fossfjörður 2011. 14. des. 2010 – 1. feb. 2011.

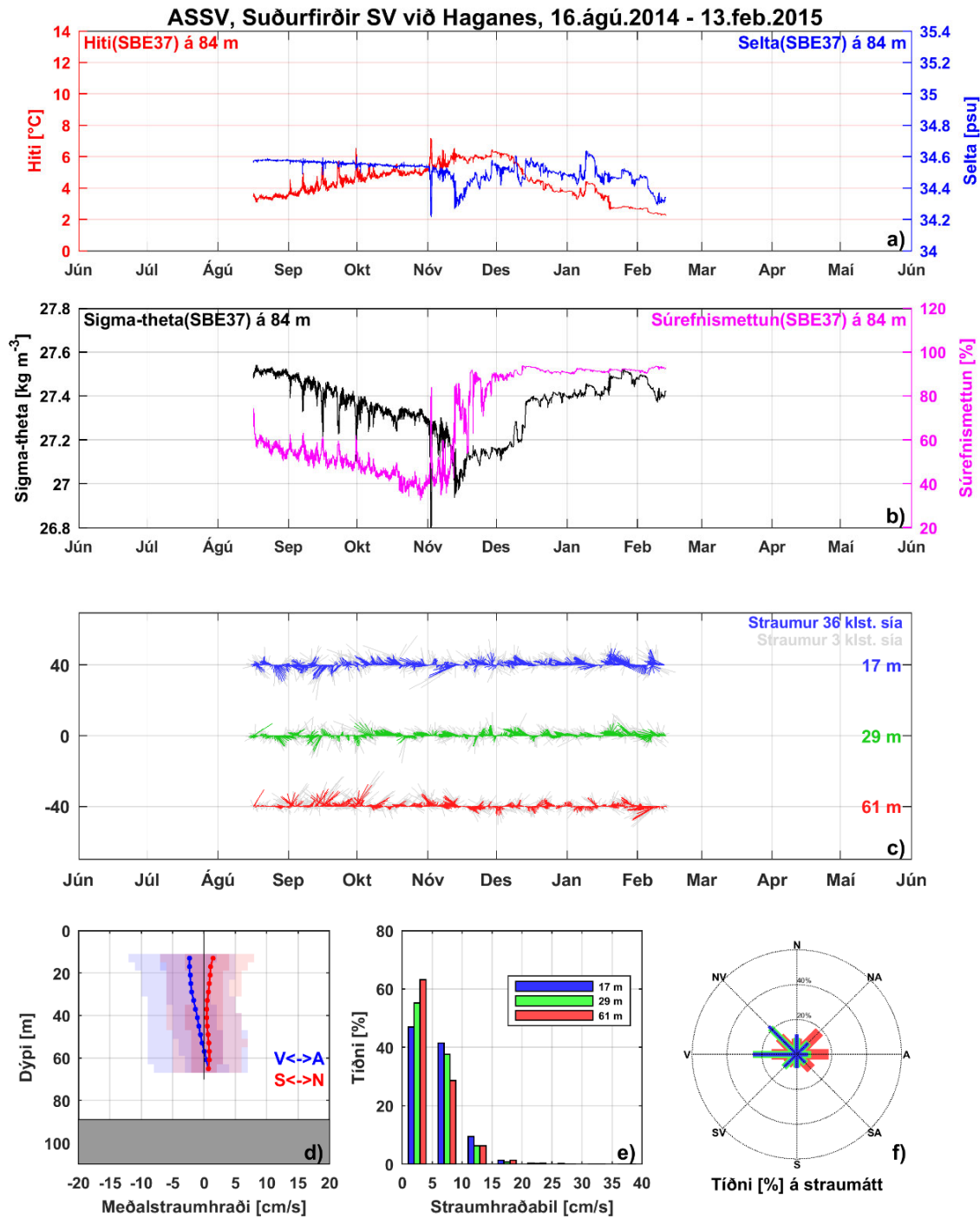
Botndýpi 70 m, ADCP á 65 m dýpi, engin SBE37 mikkroköttur.

Figure A1: Fossfjörður 2011. 14 Dec. 2010 – 01 Feb. 2011.

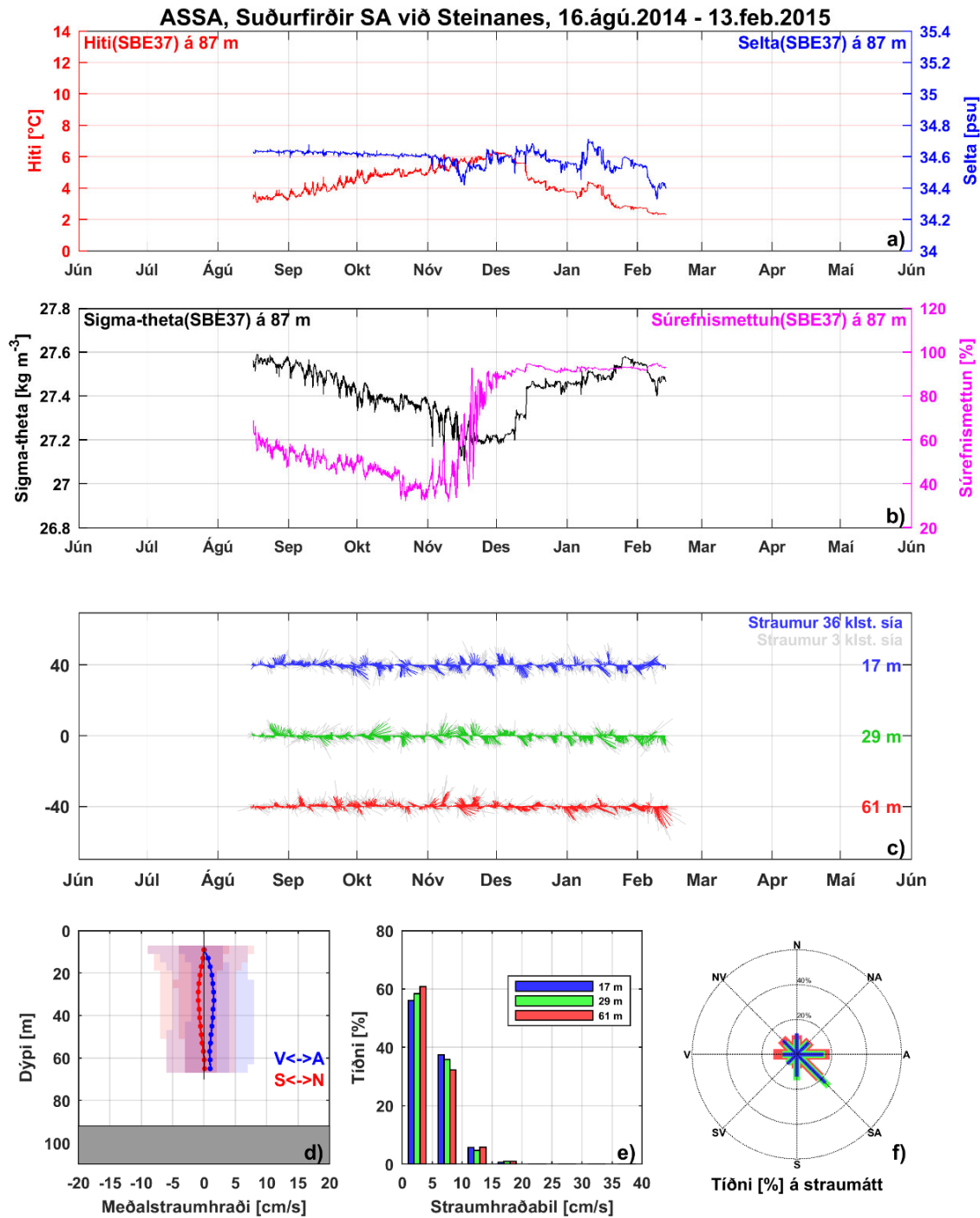
Bottom depth 70 m, ADCP at 65 m depth, no SBE37 MicroCAT.



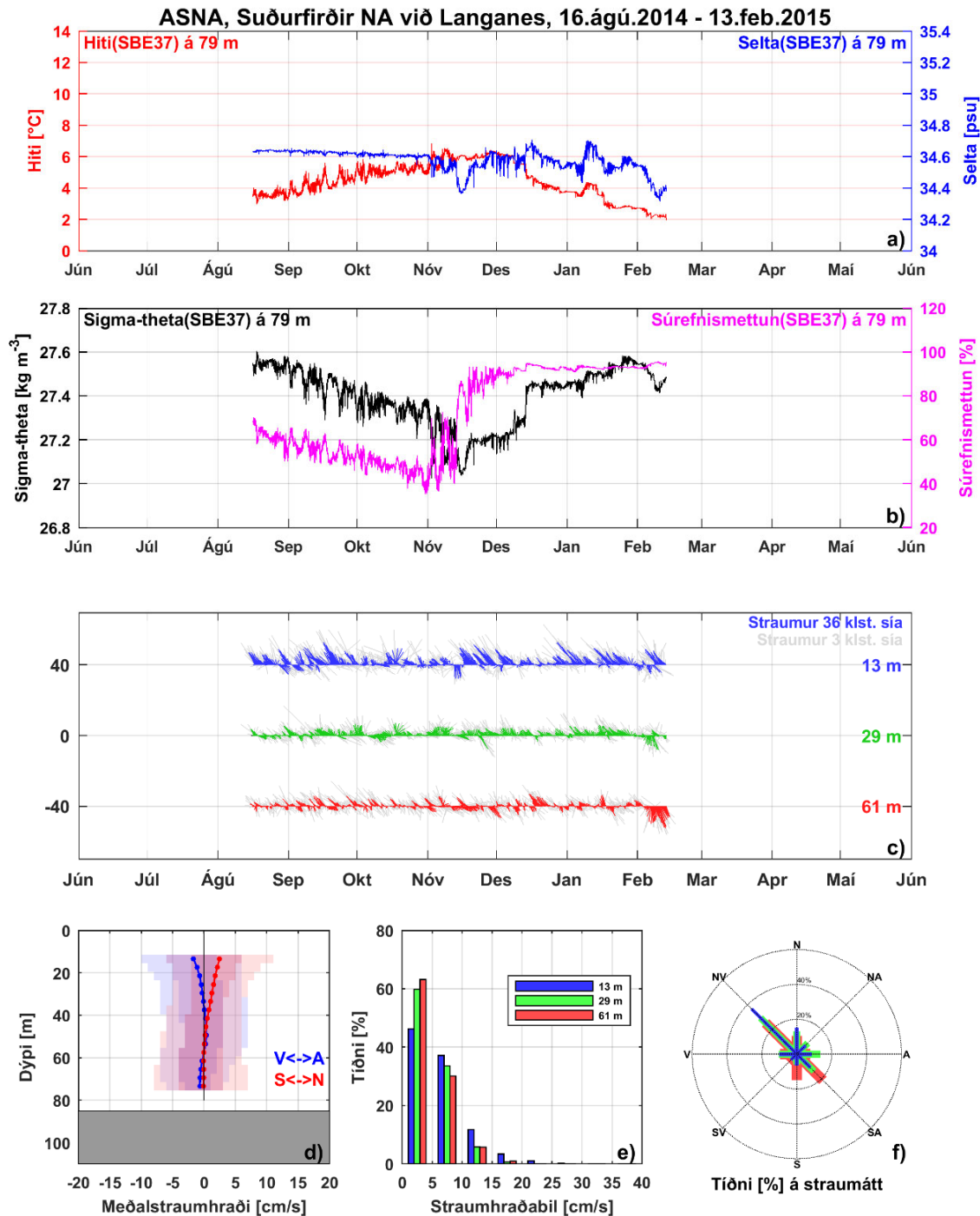
Viðauki 2. Mynd A2. ASNV Suðurfirðir norðvestur, 16. ágú. 2014 – 13. feb. 2015.
 Botndýpi 85 m, ADCP á 80 m, SBE37 míkroköttur á 79 m. Löginn staðsett við Bildudal. Færð á 3 m dýpra stað 22. sept. 2014.
 Figure A2: ASNV Suðurfirðir north-west, off Bildudalur. 16 Aug. 2014 – 13. Feb. 2015.
 Bottom depth 85 m, ADCP at 80 m, SBE37 MicroCAT at 79 m. Moved to 3 m deeper place on 22 Sep. 2014.



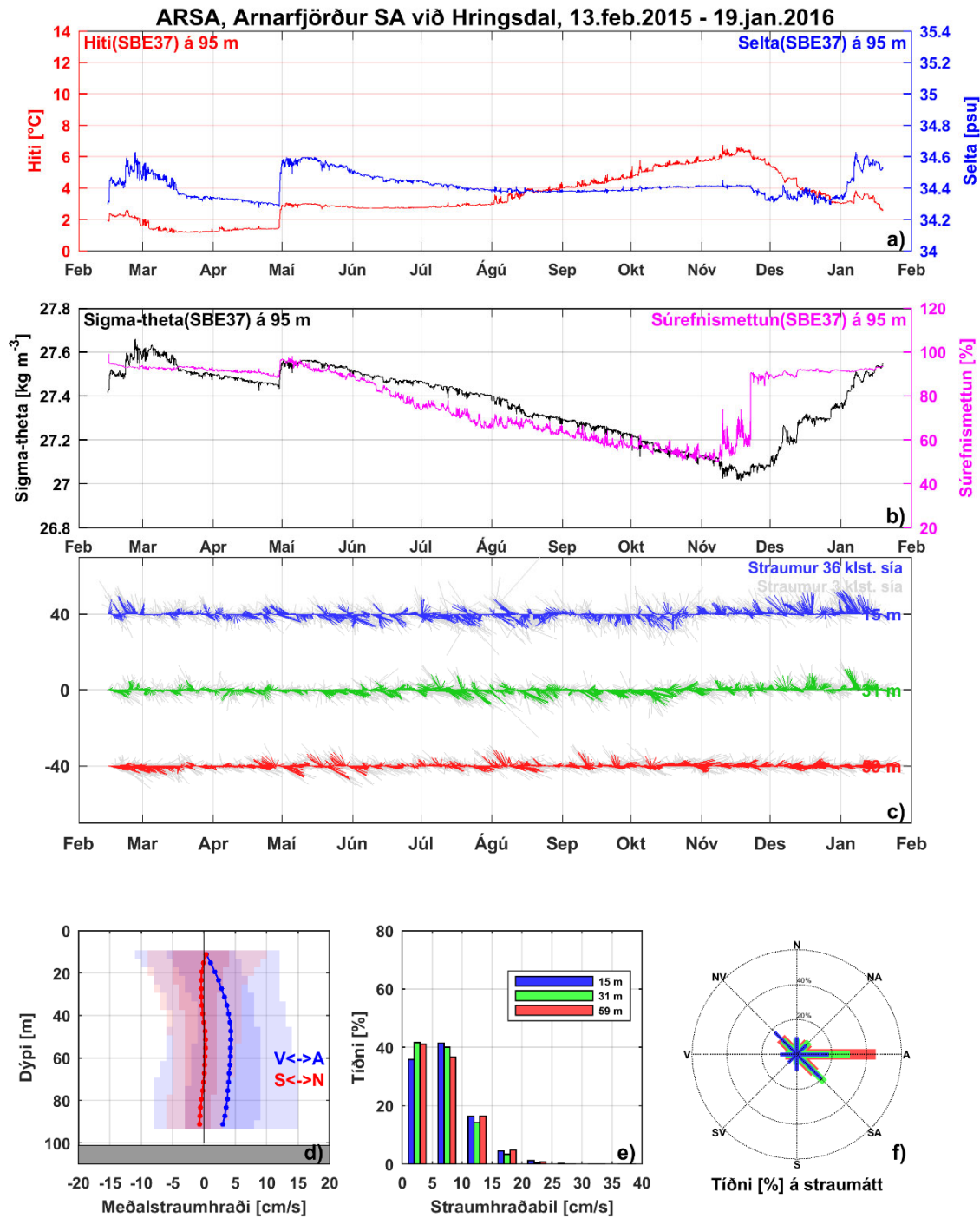
Viðauki 3. Mynd A3. ASSV Suðurfirðir suðvestur, 16. ágú. 2014 – 13. feb. 2015.
 Botndýpi 89 m, SBE37 míkroköttur á 84 m, 600 kHz-ADCP á 69 m. Lögnin staðsett við Haganes.
 Figure A3: ASSV Suðurfirðir southwest, at Haganes. 16 Aug. 2014 – 13. Feb. 2015.
 Bottom depth 89 m, SBE37 MicroCAT at 84 m, 600 kHz ADCP at 69 m.



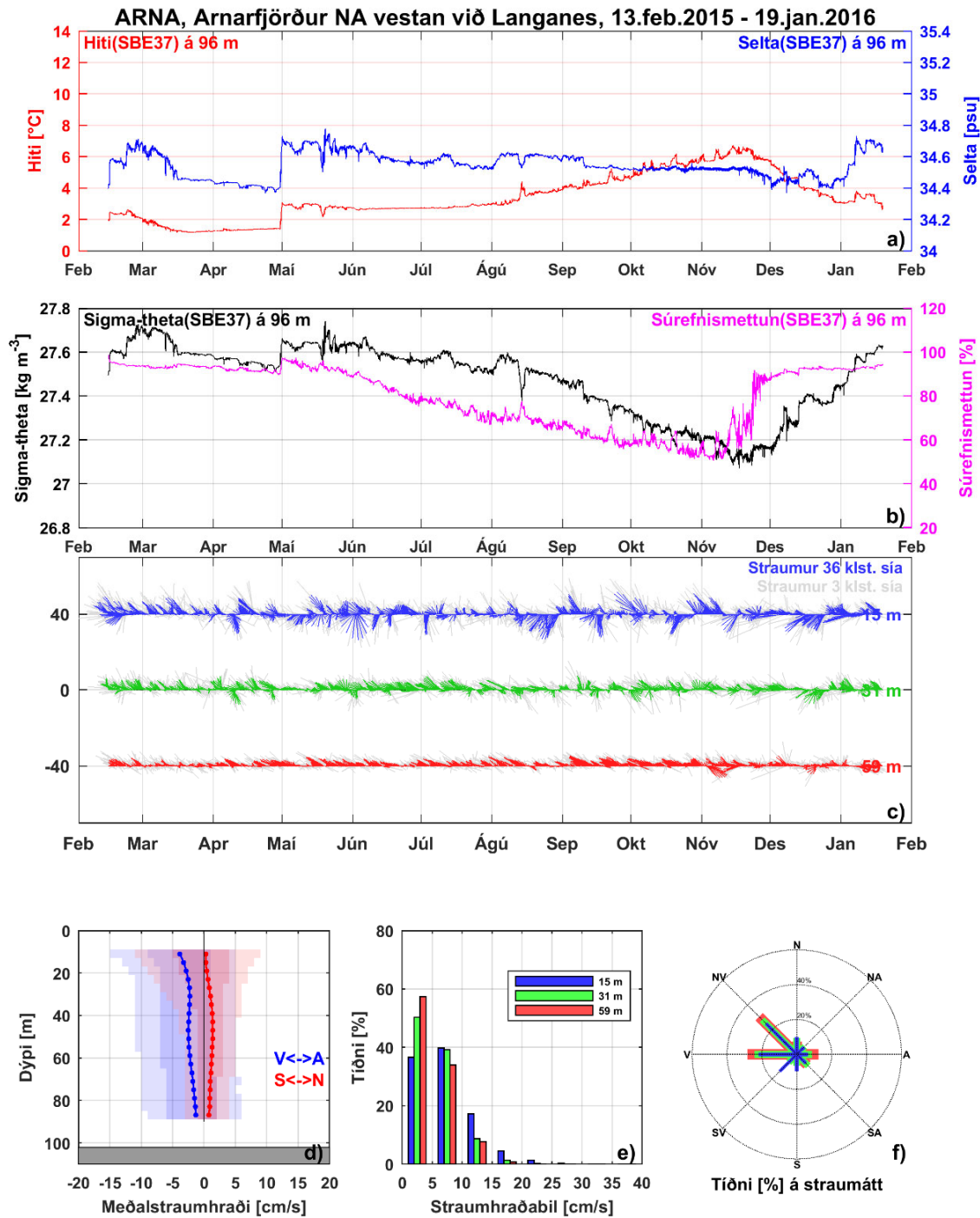
Viðauki 4. Mynd A4. ASSA Suðurfirðir suðaustur, 16. ágú. 2014 – 13. feb. 2015.
 Botndýpi 92 m, SBE37 míkroköttur á 87 m, 600 kHz-ADCP á 72 m. Lögnin staðsett við Steinanes.
 Figure A4: ASSA Suðurfirðir southeast, at Steinanes. 16 Aug. 2014 – 13. Feb. 2015.
 Bottom depth 92 m, SBE37 MicroCAT at 87 m, 600 kHz ADCP at 72 m.



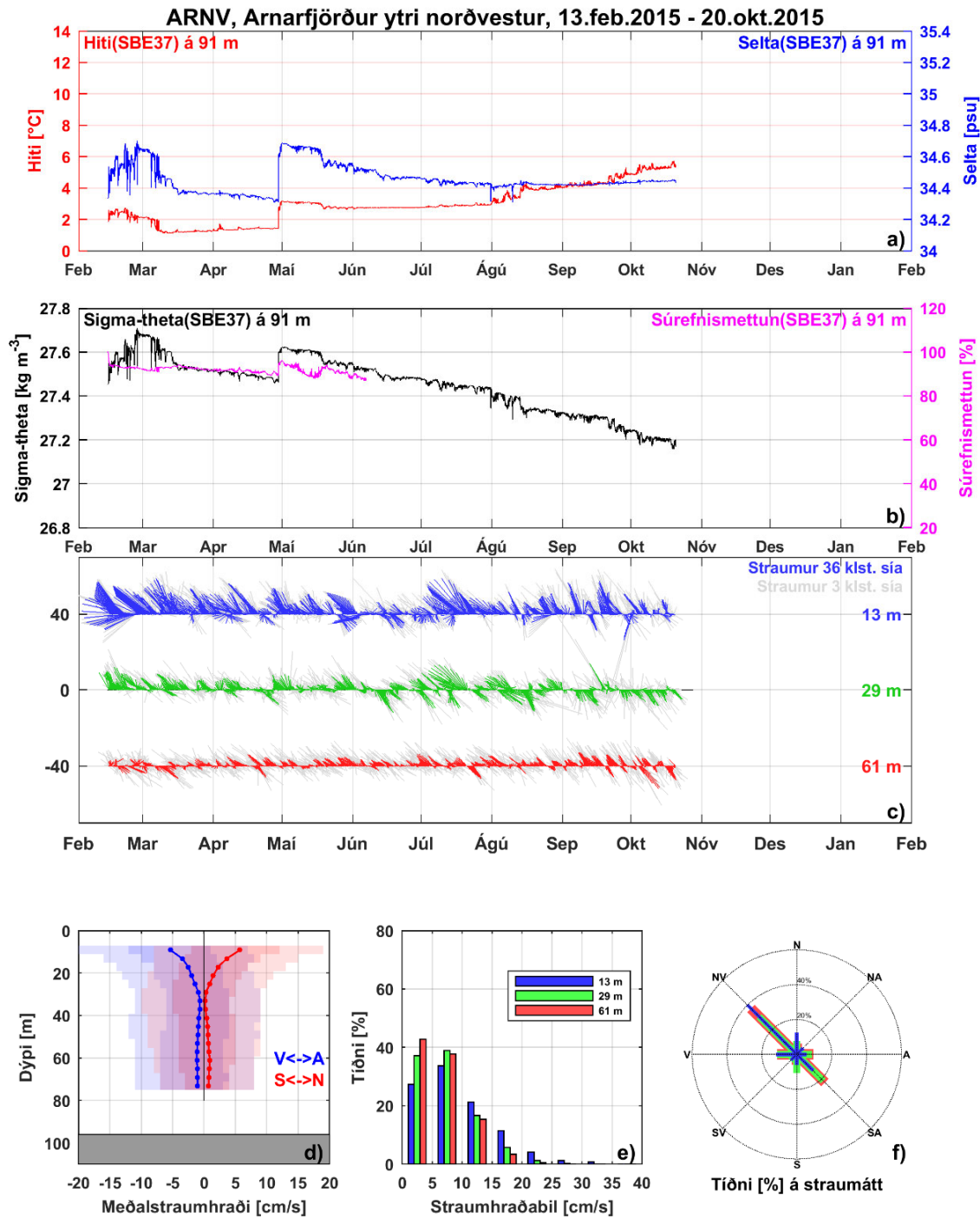
Viðauki 5. Mynd A5. ASNA Suðurfirðir norðaustur, 16. ágú. 2014 – 13. feb. 2015.
 Botndýpi 85 m, ADCP á 80 m, SBE37 míkroköttur á 79 m. Lögnin staðsett við Langanes.
 Figure A5: ASNA Suðurfirðir northeast, at Langanes. 16 Aug. 2014 – 13. Feb. 2015.
 Bottom depth 85 m, ADCP at 80 m, SBE37 MicroCAT at 79 m.



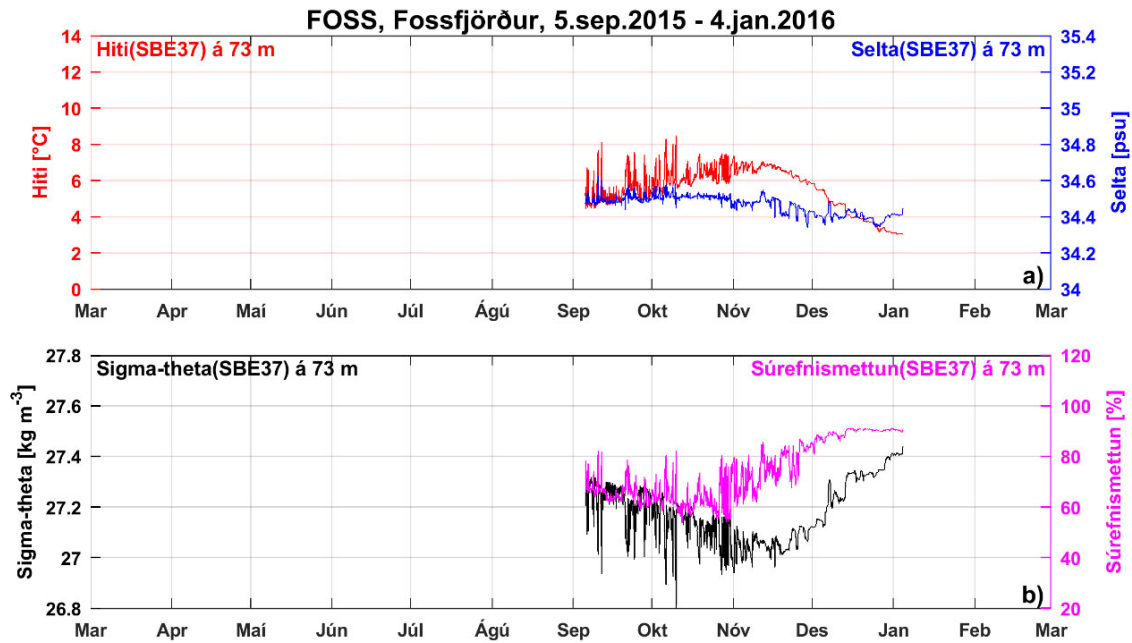
Viðauki 6. Mynd A6. ARSA Arnarfjörður suðaustur, 13. feb. 2015 – 19. jan. 2016.
 Botndýpi 101 m, ADCP á 96 m, SBE37 míkroköttur á 95 m. Lögnin staðsett við Hringsdal.
 Figure A6: ARSA Arnarfjörður southeast at Hringsdalur. 13. Feb. 2015 – 19 Jan. 2016.
 Bottom depth 101 m, ADCP at 96 m, SBE37 MicroCAT at 95 m.



Viðauki 7. Mynd A7. ARNA Arnarfjörður norðaustur, 13. feb. 2015 – 19. jan. 2016.
 Botndýpi 102 m, ADCP á 97 m, SBE37 mikkroköttur á 96 m. Lögnin er staðsett utan við Langanes.
 Figure A7: ARNA Arnarfjörður northeast off Langanes. 13. Feb. 2015 – 19 Jan. 2016.
 Bottom depth 102 m, ADCP at 97 m, SBE37 MicroCAT at 96 m.

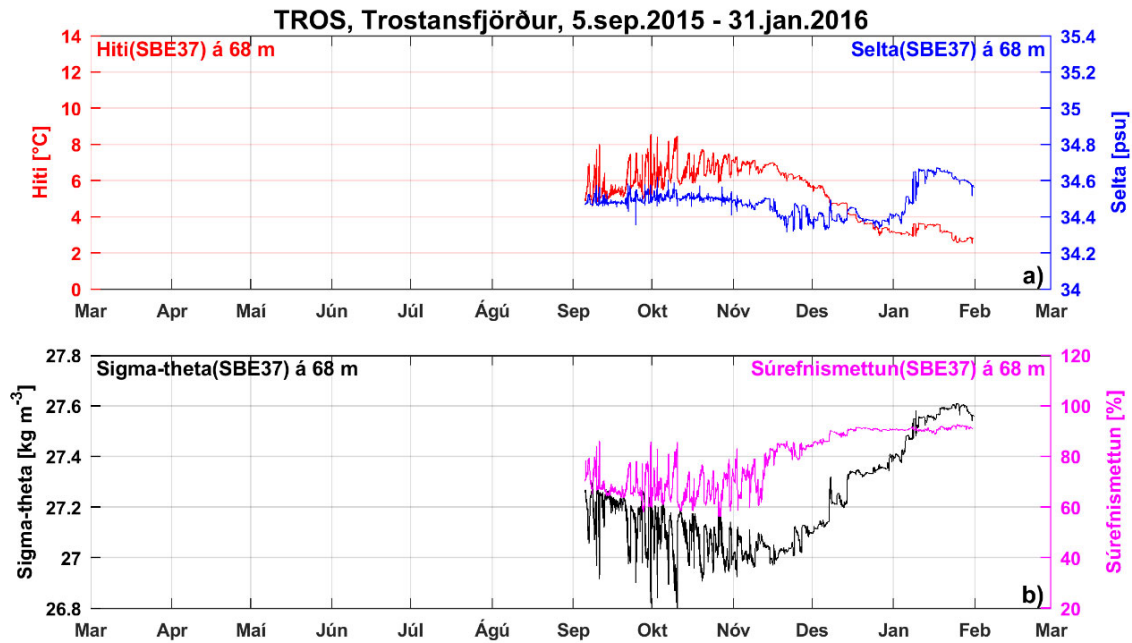


Viðauki 8. Mynd A8. ARNV Arnarfjörður ytri norðvestur, 13. feb. 2015 – 20. okt. 2015. Lögnin staðsett utan við Hlaðsbót. Botndýpi 96 m, SBE37 míkroköttur á 91 m, 600 kHz-ADCP á 76 m. Engar súrefnismælingar frá 6. júní 2015.
 Figure A8: ARNV outer Arnarfjörður northwest off Hlaðsbót. 13. Feb. 2015 – 20 Oct. 2015.
 Bottom depth 96 m, SBE37 MicroCAT at 91 m, 600 kHz ADCP at 76 m. No oxygen data after 6 June 2015.



FOSS: enginn straummælir

Viðauki 9. Mynd A9. FOSS Fossfjörður (Fjarðarlax), 5. sep. 2015 – 4. jan. 2016.
 Botndýpi 74 m, SBE37 míkroköttur á 73 m, enginn straummælir. Lögnin færð 5 m dýpra 2. des. 2015.
 Figure A9: FOSS Fossfjörður (Fjarðarlax), 5 Sep. 2015 – 4 Jan. 2016.
 Bottom depth 74 m, SBE37 MicroCAT at 73 m, no current meter. Mooring moved 5 m deeper on 2 Dec. 2015.



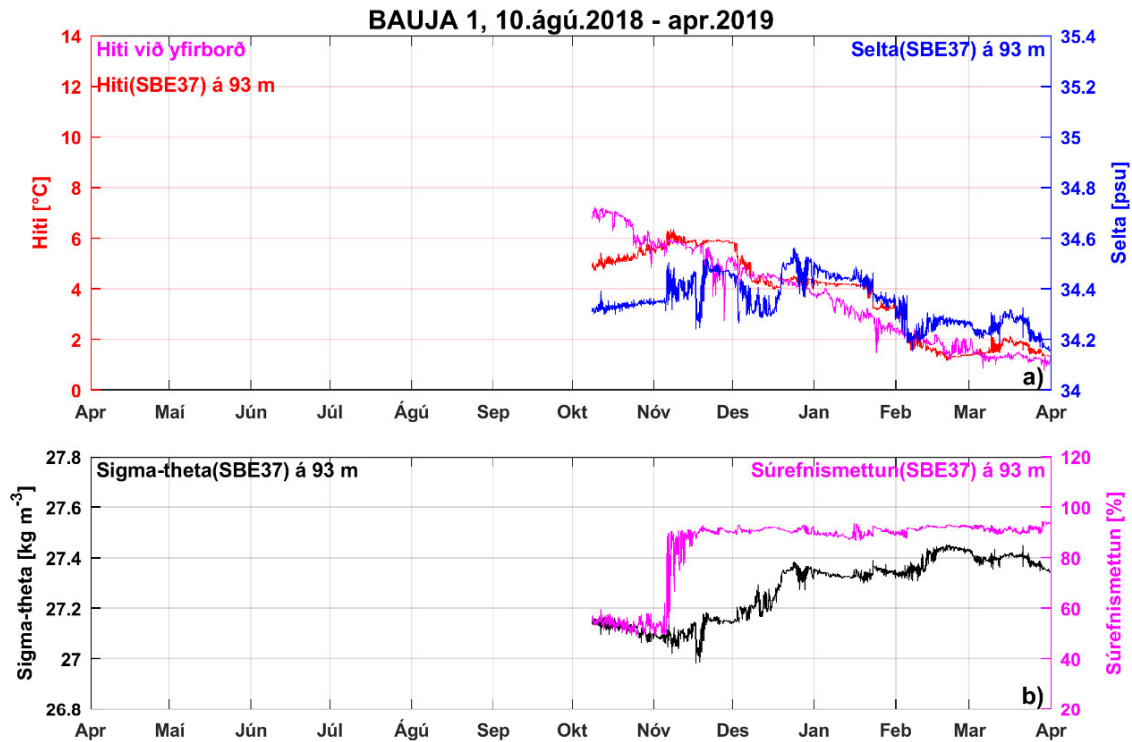
TROS: enginn straummælir

Viðauki 10. Mynd A10. TROS Trostansfjörður (Fjarðarlax), 5. sep. 2015 – 31. jan. 2016.
 Botndýpi 69 m, SBE37 míkroköttur á 68 m, enginn straummælir.
 Figure A10: FOSS Fossfjörður (Fjarðarlax), 5 Sep. 2015 – 4 Jan. 2016.
 Bottom depth 69 m, SBE37 MicroCAT at 68 m, no current meter.



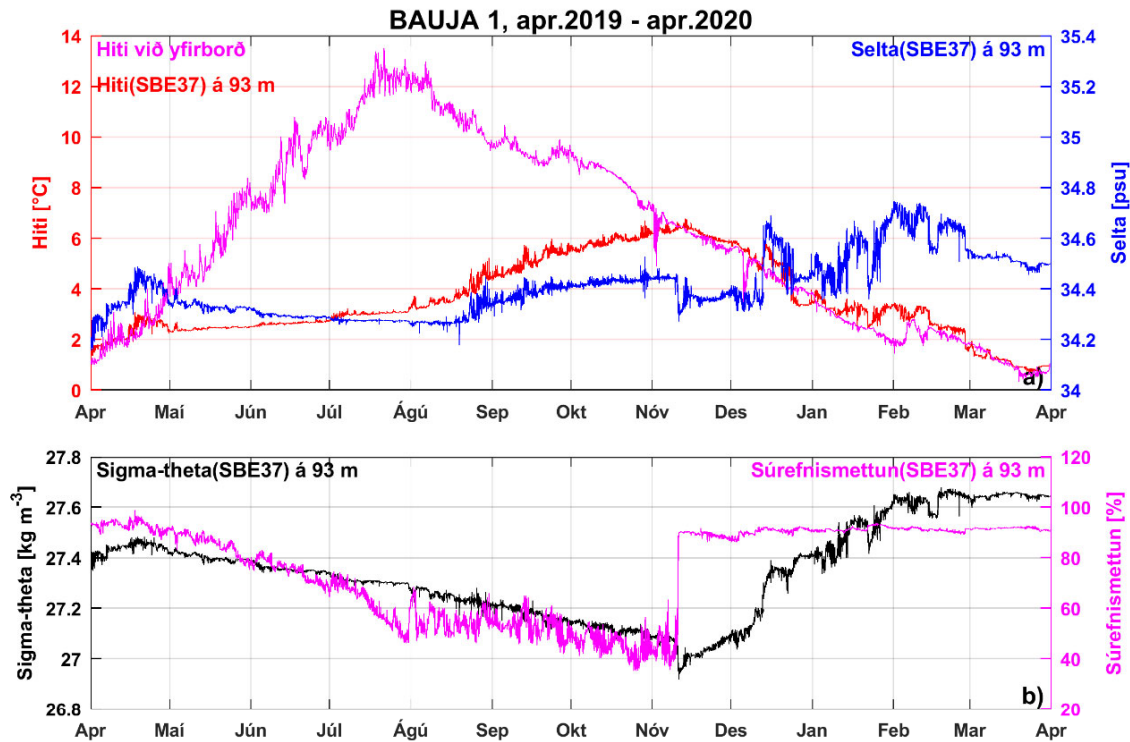
ARNV: enginn straummælir

Viðauki 11. Mynd A11. ARNV2018 Arnarfjörður ytri norðvestur, 19.mai 2017–12.feb. 2018. Lögnin staðsett utan við Hlaðsbót. Botndýpi 99 m, SBE37 míkroköttur á 95 m, enginn straummælir. Lögnin færðist lítillega 13. okt. 2017.
 Figure A11: ARNV2018, outer Arnarfjörður northwest, off Hlaðsbót. 19 May 2017 – 12 Feb 2018.
 Bottom depth 99 m, SBE37 MicroCAT at 95 m, no current meter. Minor move on 13 Oct 2017.



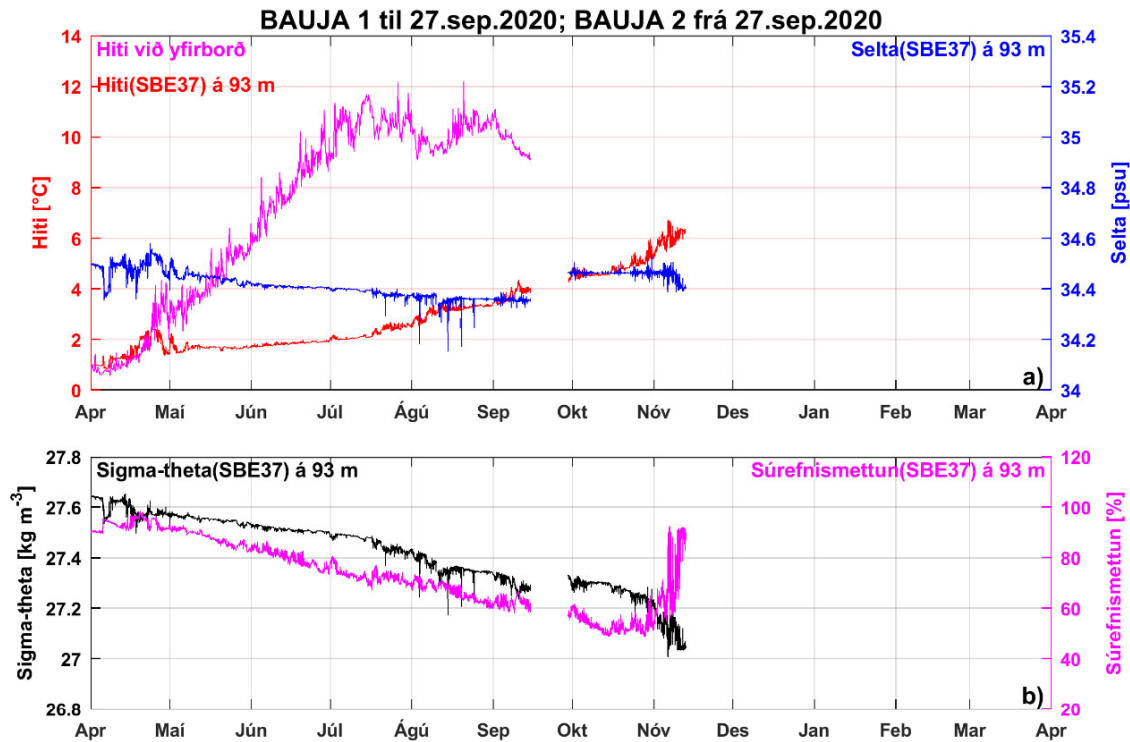
ARBAUJA: enginn straummælir

Viðauki 12. Mynd A12. BAUJA 1 vöktunarbauja, gögn frá 10. ágú. 2018 – 1. apr. 2019. Botndýpi 100 m, SBE37 míkroköttur á 93 m, og hiti við yfirborð. Enginn straummælir. Baujan staðsett utan við Hlaðsbót. Figure A12: BAUJA 1, the first monitoring buoy off Hlaðsbót. Since 10 Aug. 2018, figure shows data until 1 Apr. 2019. Bottom depth 100 m, SBE37 MicroCAT at 93 m, surface temperature. No current meter.



ARBAUJA: enginn straummælir

Viðauki 13. Mynd A13. BAUJA 1 vöktunarbauja, gögn frá 1. apr. 2019 – 1. apr. 2020. Botndýpi 100 m, SBE37 míkroköttur á 93 m, og hiti við yfirborð. Enginn straummælir. Baujan staðsett utan við Hlaðsbót. Figure A13: BAUJA 1, the first monitoring buoy off Hlaðsbót. Figure shows data 1 Apr. 2019 – 1 Apr. 2020. Bottom depth 100 m, SBE37 MicroCAT at 93 m, surface temperature. No current meter.



ARBAUJA: enginn straummælir

Viðauki 14. Mynd A14. BAUJA 1 og 2 vöktunarbaujur, gögn frá 1. apr. 2020 – des. 2020.

Bauja 1 tekin upp 27. sep. 2020, en mælingar hættu 15. sep. 2020. Bauja 2 sett út 27. sep. 2020. Botndýpi 100 m, SBE37 míkroköttur á 93 m, og hiti við yfirborð (bauja 1). Enginn straummælir. Baujurnar staðsettar utan við Hlaðsbót.

Figure A14: BAUJA 1 and 2, monitoring buoys off Hlaðsbót. Buoy 1 taken up on 27 Sep. 2020, though measurements already stopped on 15 Sep. 2020. Buoy 2 deployed 27 Sep. 2020.

Bottom depth 100 m, SBE37 MicroCAT at 93 m, surface temperature (buoy 1 only). No current meter.



HAFRANNSÓKNASTOFNUN

Rannsókn- og ráðgjafarstofnun hafs og vatna