

Sæunn Halldórsdóttir

Áhrif afrennslis og tímaupplausnar vindasviðs á reiknaða yfirborðsstrauma við Ísland

Ritgerð til M.S. prófs í jarðeðlisfræði unnin við Raunvísindadeild Háskólans

Upphafsorð

Í þessari greinargerð birtist M.S. ritgerð mín í heild sinni eins og henni var skilað til Raunvísindadeildar Háskóla Íslands í júní 2006. Ég vil þakka leiðbeinendur mínum þeim Haraldi Ólafssyni, Halldóri Björnssyni og Jóni Ólafssyni samstarfið síðastliðin ár. Ég vil einnig nota tækifærið og þakka tengdamóður minni Jónínu Sigurlaugu Marteinsdóttur fyrir hjálpina við yfirlestur ritgerðarinnar.

Reykjavík, 22. desember 2006
Sæunn Halldórsdóttir

Útdráttur

Haflíkanið MOM4 (Modular Ocean Model) er notað til að reikna yfirborðsstrauma við Ísland. Í fyrstu er líkanið þvingað með meðalárstíðasveiflu sem er reiknuð út frá mánaðarmedaltölum veðurfarsgagna frá tímabilinu 1958-2002. Niðurstöður úr þessari meðalkeyrslu eru bornar saman við meðaltöl brúunargilda sjávarmælinga Hafrannsóknastofnunarinnar. Árstíðabundinn breytileiki í sjávarhita og seltu kemur fram í líkaninu en hann er ekki eins mikill og kemur fram í brúunargildum. Áhrif afrennslis af Íslandi á sjávarhita og straumsvið í meðalkeyrslunni voru skoðuð. Afrennslíð veldur réttsælis straumi umhverfis Ísland. Hann styrkir strandstraum sem er til staðar í meðalkeyrslunni og veldur það hlýnun við norðurströndina. Straumurinn hefur einnig áhrif á staðsetningu hitaskila fyrir austan landið. Afrennslíð hefur áhrif á árstíðasveiflu sjávarhita við landið. Þar sem straumaukning vegna afrennslis er mest er ekki hægt að finna neinn árstíðabundinn breytileika í straumstyrk tengdan árstíðasveiflu í afrennslí.

Áhrif hvassviðrakafla á flæði við Ísland voru skoðuð með tilraun þar sem flæðið var þvingað með sterkum og stöðugum vindi. Norðlægar áttir takmarka flæði Atlantssjávar norður fyrir Vestfirði inn á Norðurmið og suðlægar áttir auka innflæðið. Suðvestanátt er ekki eins hagstæð innflæðinu og sunnan- og suðaustanátt. Einnig er norðaustanátt ekki eins óhagstæð og norðan- og norðvestanátt. Vindgögn frá 1995 voru notuð til að skoða áhrif tímaupplausnar á strauma. Annars vegar voru straumar reiknaðir með vindi (vindspennu) sem tekur daglegum breytingum og hins vegar með vindi sem tekur mánaðarlegum breytingum. Vindþvingun er stöðugri þegar vindur tekur mánaðarlegum breytingum en þegar hann tekur daglegum breytingum. Það veldur því að massaflutningur með austurströnd Grænlands er meiri þegar um mánaðarlegan breytileika er að ræða. Innstreymi Atlantssjávar á Norðurmið er minna þegar vindur tekur daglegum breytingum og sjávarhiti við Norðurland í febrúar og maí er nær brúunargildum sjávarhita frá þessum árstímum.

Abstract

Ocean currents around Iceland are simulated with the ocean current model MOM (Modular Ocean Model). The flow is forced with monthly climatology derived from data from the period 1958-2002. Hydrographic data from the Icelandic Marine Institute is interpolated and compared to the output from the model. There are seasonal variations in oceanic temperature and salinity in the model but they are not as large as in the interpolated data. The effects of runoff from Iceland on the mean circulation in the model are studied. The runoff generates an anticyclonic current over the Icelandic shelf which affects temperature fronts east off Iceland. This current intensifies a coastal current observed in the mean circulation, rising temperatures in coastal areas off North-Iceland. The runoff affects seasonal variation in the oceanic temperature around Iceland. Where the current increases the most, no seasonal variability was found that could be related to seasonal variation in the runoff.

Effects of strong wind forcing on the ocean circulation were studied with experiments where the flow was forced by strong and steady winds. Northerly winds reduce the flow of Atlantic water to the North-Icelandic shelf and southerly winds increase the flow. Winds from the southwest increase the flow less than winds from the south and southeast. Winds from the north and northwest suppress the flow more than winds from the northeast. Wind data from 1995 was used to study the effects of temporal resolution of the wind field on the circulation. Two experiments were carried out, one where the flow was forced with monthly means of wind stress and another where the flow was forced with daily means of wind stress. The wind forcing is more steady in the case of monthly varying winds and because of that there is more mass transport along the coast of Greenland when monthly means are used. The flow of Atlantic water to the North-Icelandic shelf is less in the case of daily varying wind and the oceanic temperature in the waters off North-Iceland in February and May are closer to values in the interpolated data from the same periods.

Efnisyfirlit

Myndaskrá	xiii
1 Inngangur	1
2 Hafið við Ísland	3
2.1 Sjávarmælingar og brúun þeirra	7
3 Hafið MOM4 og staðalkeyrslur	12
3.1 Grunnjöfnur	12
3.2 Uppsetning staðalkeyrslna	15
3.3 Niðurstöður staðalkeyrslna	18
4 Áhrif afrennslis á strandstrauma	24
4.1 Fræði	24
4.2 Uppsetning tilraunar	25
4.3 Niðurstöður	28
4.4 Umræða	32
5 Áhrif hvassviðrakafla	36
5.1 Fræði	36
5.2 Uppsetning tilraunar	38
5.3 Niðurstöður	39
5.4 Umræða	44
6 Áhrif mismunandi tímaupplausnar vindasviðs	46
6.1 Fræði	46
6.2 Uppsetning tilraunar	49
6.2.1 Vindasvið og ástand sjávar 1995	51
6.3 Niðurstöður	53
6.4 Umræða	60
7 Samantekt og lokaorð	67
Heimildir	70
A Netsetning sjávarmælinga	73
A.1 Viðfangsgreining (<i>Objective analysis</i>)	73
A.2 Brúunarforrit	74
B Vindspenna reiknuð í lofthjúpslíkani ECMWF	76

Myndaskrá

1	Staðalfrávik sjávarhita ($^{\circ}\text{C}$) að vori reiknað út frá mælingum úr vorleiðöngnum Hafrannsóknastofnunarinnar 1991-1993, 1995-1996 og 1998-2000.	2
2	Yfirborðsstraumar umhverfis Ísland. Myndir er byggð á gögnum frá rekduflum á 15 m dýpi.	4
3	Yfirborðsstraumar sem flytja Atlantssjó um Norður-Atlantshaf og Norðurhöf.	4
4	Yfirborðsstraumar umhverfis Ísland.	5
5	Föst snið Hafrannsóknastofnunarinnar við Ísland.	6
6	Sjávarhiti (a) og selta (b) á 50 m dýpi í vetrarleiðangri Hafrannsóknastofnunarinnar í febrúar-mars 1995 ásamt reiknaðri skekkju(c).	8
7	Netsett gögn sem sýna hita ($^{\circ}\text{C}$) á 50 m dýpi á mismunandi árstímum. Gögnin eru frá 1991-1993, 1995-1996 og 1998-2000.	10
8	Netsett gögn sem sýna seltu á 50 m dýpi á mismunandi árstímum. Gögnin eru frá 1991, 1992, 1993 og 1995.	11
9	Líkansvæðið og botnlögun eins og hún kemur fram í líkaninu ásamt helstu kennileitum.	13
10	Botnlögun eins og hún kemur fram í líkaninu.	15
11	Staðalkeyrsla, flæðið er þvingað með meðalárstíðasveiflu. Straumur (m/s) og hiti ($^{\circ}\text{C}$) á 50 m dýpi.	18
12	(a) Straumur í norður-suður stefnu á Faxaflóasniði. (b) Sjávarhiti á Faxaflóasniði. (c) Selta á Faxaflóasniði. Myndirnar sýna ársmeðaltöl.	19
13	(a) Straumur í austur-vestur stefnu á Hornbankasniði. (b) Sjávarhiti á Hornbankasniði. (c) Selta á Hornbankasniði. Myndirnar sýna ársmeðaltöl.	20
14	Hiti á 0-50 m dýpi á mismunandi árstímum eins og hann kemur fram í staðalkeyrslunni.	22
15	Selta á 0-50 m dýpi á mismunandi árstímum eins og hann kemur fram í staðalkeyrslunni.	23
16	Rennsli af Íslandi skipt niður á landshluta.	25
17	Meðalársrennsli ($\text{kg s}^{-1}\text{m}^{-2}$) af Íslandi. Tölurnar eru byggðar á gögnum frá Orkustofnun sem koma fram á mynd 16.	26
18	Ársmeðaltal straums (m/s) og hita ($^{\circ}\text{C}$) á 0-50 m dýpi í staðalkeyrslu með og án afrennslis.	27
19	Mismunur meðalstraums (m/s) og meðalhita ($^{\circ}\text{C}$) á 0-50 m dýpi.	28
20	Straumur (cm/s) í norður-suðurstefnu á Faxaflóasniði í staðalkeyrslu með og án afrennslis.	30
21	Straumur (cm/s) í austur-vesturstefnu á sniði við Hornbanka í staðalkeyrslu með og án afrennslis.	31
22	Árstíðasveifla sjávarhita á Faxaflóasniði.	33
23	Árstíðasveifla sjávarhita á Hornbankasniði.	33

24	Straumur (m/s) og hiti ($^{\circ}\text{C}$) á 0-50 m dýpi í staðalkeyrslu með afrennsli á mismunandi árstímum.	35
25	Vindspenna við Ísland 13. janúar 1995.	38
26	Straumur og hiti við yfirborð eftir 10 daga af stöðugum vindi úr N, NA, A, SA, S, SV, V og NV.	40
27	Hæð sjávar miðað við viðmiðunarflöt (jafnmættisflöt) eftir 10 daga af stöðugum vindi úr N, NA, A, SA, S, SV, V og NV.	41
28	Hiti ($^{\circ}\text{C}$) og straumur (m/s) í yfirborði eftir 10 daga sterka SV átt og 10 dögum síðar.	45
29	Hlutfallslegur munur á því vindafli sem fæst með dagsmeðaltölum og mánaðarmeðaltölum.	48
30	Meðalþrýstingur (Pa) við sjávarmál árið 1995.	48
31	Vindspenna, x- og y-þáttur, í punktinum $65^{\circ}54'\text{N}$ og $26^{\circ}29'\text{W}$ (stöð 6 á Látrabjargssniði) fyrir hvern dag líkanársins.	49
32	Vindspenna, stærð og stefna, í punktinum $65^{\circ}54'\text{N}$ og $26^{\circ}29'\text{W}$ (stöð 6 á Látrabjargssniði) fyrir hvern dag líkanársins.	50
33	(a) Meðalvindasvið í staðalkeyrslu, ársmeðaltal reiknað út frá mánaðarmeðaltölum árána 1958-2002. (b) Meðalvindasvið ársins 1995, ársmeðaltal reiknað út frá mánaðarmeðaltölum ársins 1995.	52
34	Straumur (m/s) og mættishiti ($^{\circ}\text{C}$) á 0-50 m dýpi þegar flæðið hefur verið þvingað með hita og vindgögnum frá 1995.	54
35	Mismunur straums (m/s) og mættishita ($^{\circ}\text{C}$) á 0-50 m dýpi. Svið sem þvingað er með mánaðarmeðaltölum er dregið frá sviði sem er þvingað með dagsmeðaltölum.	55
36	Straumur (cm/s) í norður-suðurstefnu á Faxaflóasniði í keyrslu með daglegum og mánaðarlegum gögnum frá 1995.	56
37	Straumur (cm/s) í austur-vesturstefnu á sniði við Hornbanka í keyrslu með daglegum og mánaðarlegum gögnum frá 1995.	57
38	Meðalársflæði Sv ($10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) á 0-500 m dýpi á sniðinu sem liggur á 23°W milli $66^{\circ}30'\text{N}$ og $69^{\circ}30'\text{N}$	58
39	Flæði í Sv ($10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) á 0-300 m dýpi á Hornbankasniði.	59
40	Meðaltöl hita og seltu 0-300 m dýpi á Hornbankasniði.	59
41	Brúunargildi á 50 m dýpi úr leiðöngnum Hafrannsóknastonunarinnar árið 1995.	63
42	Niðurstöður úr keyrslu með dagsmeðaltölum: Hiti og straumur á 0-50 m dýpi.	64
43	Niðurstöður úr keyrslu með mánaðarmeðaltölum: Hiti og straumur á 0-50 m dýpi.	65
44	Mismunasvið fyrir hita og straum á 0-50 m dýpi: Hiti og straumur í keyrslu með mánaðarmeðaltölum er dregin frá hita og straumi í keyrslu með dagsmeðaltölum.	66
45	Punktar á reglulegu neti ásamt rúmskalanum (S_x, S_y, S_z)	73

1 Inngangur

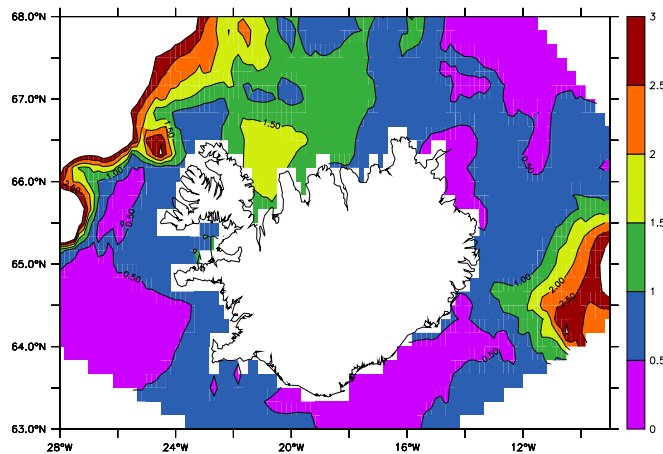
Haflíkan hefur verið sett upp til að reikna strauma umhverfis Ísland. Líkanið hefur verið þvingað með meðalárstíðasveiflu hita og vinds (vindspennu) við yfirborð. Hér verða niðurstöður úr slíkri *staðalkeyrslu* kynntar. Straumar í líkaninu verða bornir saman við staðsetningu strauma á kortum byggðum á mælingum frá þessu hafsvæði. Hita- og seltudreifing verður einnig borin saman við mælingar frá Hafrannsóknastofnuninni. Markmið verkefnisins er þó fyrst og fremst að kanna áhrif afrennslis og tímaupplausnar vindasviðs á strauma við Ísland. Staðalkeyrslan er notuð sem grunnur fyrir aðrar reiknitraunir í líkaninu. Áhrif afrennslis verða könnuð með því að bæta rennsli af Íslandi inn í líkanið. Áhrif tímaupplausnar verða skoðuð með því að nota gögn um hita og vind frá 1995. Flæðið er annars vegar þvingað með mánaðarmedaltölum og hins vegar með dagsmedaltölum frá því ári. Áhrif hvassviðrakafla af ýmsum áttum verða einnig könnuð sérstaklega með það fyrir augum að skoða áhrif mismunandi átta á flæði og dreifingu hita og seltu við Ísland.

Ástandi hafsins við Ísland er hægt að lýsa með upplýsingum um útbreiðslu sjávarhita og seltu. Sjógerð er skilgreind út frá ákveðnum hita- og seltugildum. Yfirborðssjógerðir við Ísland eru: Atlantssjór ($t > 3^{\circ}\text{C}$, $s > 34.9$), pólsjór ($t < 0^{\circ}\text{C}$, $s < 34.4$) og svalsjór¹ ($t = 0\text{--}2^{\circ}\text{C}$, $s = 34.3\text{--}34.9$).² Fleiri sjógerðir hafa verið skilgreindar fyrir þetta svæði en hægt er að líta á þær sem blöndu af þessum þremur sjógerðum. Hafrannsóknastofnunin mælir ársfjórðungslega hita og seltu á miðunum í kringum Ísland. Liður í verkefninu var að þróa aðferðir til að brúa sjávarmælingar frá Hafrannsóknastofnuninni yfir á reglulegt net til að hægt væri að bera hita- og seltusvið í líkaninu saman við mælingar. Mestur breytileiki milli ára og árstíða er í ástandi sjávar fyrir norðan land. Mynd 1 sýnir staðalfrávik sjávarhita að vori. Það er reiknað út frá mælingum úr vorleiðöngnum Hafrannsóknastofnunarinnar á árunum 1990-2000. Hér verður sjónum einkum beint að því hvaða þættir hafa áhrif á ástandið fyrir norðan landið.

Árið 2001 hófst vinna við verkefnið *Líkanareikningar á breytileika í hafi* sem var styrkt af *Markáætlun um upplýsingatækni og umhverfismál* Rannsóknamiðstöðvar Íslands (Rannís) (Halldór Björnsson o.fl., 2006). Nokkur reiknilíkön voru sett upp á tölvueyki og þau prófuð með tilliti til hversu auðvelt væri að aðlagja þau að hafsvæðinu umhverfis Ísland. Haflíkanið MOM4 (*Modular Ocean Model*) frá GDFL (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*) varð fyrir valinu. Til að byrja með hefur líkanið verið þvingað með meðalárstíðasveiflu sem er reiknuð út frá veðurfarsgögnum sem ná yfir nokkra áratugi. Tilgangurinn með því er að nota meðaltalsgögnin til að herma meðalástand eðlisþátta í líkaninu. Gildi úr slíkri keyrslu er hægt að nota til að upphafstillja aðrar reiknitraunir. Í þessu verkefni voru gerðar þrjár tilraunir sem í grunninn voru settar upp á sama hátt og staðalkeyrslan. Þær eru hannaðar til að kanna áhrif breytilegrar þvingunar á

¹Svalsjór er einnig hægt að líta á sem blöndu af pólsjó og Atlantssjó.

²Skilgreining á sjógerðum er úr grein Svend-Aage Malmberg og Héðins Valdimarssonar (2003).



Mynd 1: Staðalfrávik sjávarhita ($^{\circ}\text{C}$) að vori reiknað út frá mælingum úr vorleið-
öngnum Hafrannsóknastofnunarinnar 1991-1993, 1995-1996 og 1998-2000.

meðalástandið. Tilraunirnar eru meðal annars hannaðar með það að markmiði að bæta staðalkeyrsluna og til að kanna hvernig náttúrulegur breytileiki Íslandsmiða kemur fram í líkaninu.

Úrkoma sem fellur af landi rennur til sjávar og blandast sjó við ströndina. Eðlisþyngdarbreytingar vegna ferskvatnsflæðisins valda straumi frá ströndinni. Vegna áhrifa frá svigkrafti jarðar (*e. Coriolis force*) sveigist straumurinn til hægri við straumstefnuna og heildaráhrifin verða straumur sem er réttsælis umhverfis landið. Orkustofnun hefur safnað gögnum um meðalmánaðarennslis af landinu (Kristinn Einarsson, 2004) og verða gögnin notuð til að kanna áhrif afrennslisins á strauma á landgrunninu. Sérstaklega verður kannað hvort afrennslíð hafi einhver áhrif á innstreymi Atlantssjávar á Norðurmið.

Unnsteinn Stefánsson (1962) lýsti sambandi milli tíðni norðanáttanna í maí og ástands sjávar fyrir norðaustan landið í ágúst. Þetta útskýrði hann með tilliti til áhrifa norðlægra vindátta á innflæði Atlantssjávar til Norðurmiða. Þegar þær væru tíðar hefði það hamlandi áhrif á innflæðið. Unnsteinn (1999) og Jón Ólafsson (1999) sýndu fram á að mismunur á tíðni norðan- og sunnanátta útskýrði að tiltölulega miklu leyti breytileika í ástandi sjávar fyrir norðan Ísland. Þegar norðanáttir væru tíðari væru hiti og selta undir meðallagi en öfugt ef sunnanáttir væru tíðari. Áhrif hvassviðrakafla verða könnuð með tilliti til áhrifa á innflæði Atlantssjávar með Irmingerstraumnum til Norðurmiða. Einnig hvort áhrif þeirra geti varað í lengri tíma og þannig haft áhrif á meðalástand sjávar þó þeir komi ekki fram í meðaltali vindasviðs. Athugaður verður munur á meðalástandi sjávar þegar vindasvið tekur annars vegar daglegum og hins vegar mánaðarlegum breytingum.

2 Hafið við Ísland

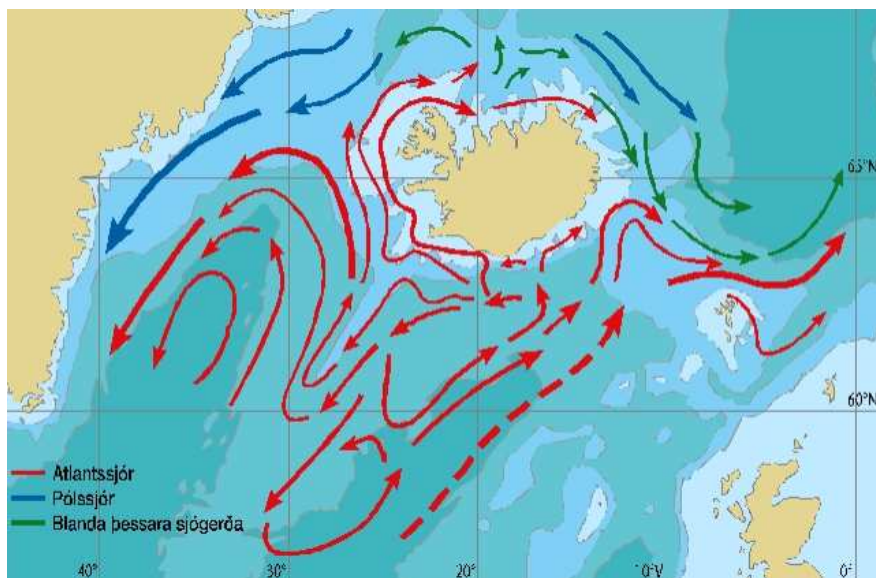
Hafsvæðið umhverfis Ísland einkennist af því að þar mætast hafstraumar sem bera annars vegar með sér hlýjar sjógerðir og hins vegar kaldar sjógerðir. Grein úr Golfstraumnum (Norður-Atlantshafsstraumnum) ber hlýjan og selturíkan Atlantssjó (*e. Atlantic Water*) upp að suðurströnd landsins (Unnsteinn Stefánsson, 1999). Fyrir norðvestan landið flytur Austur-Grænlandsstraumurinn kaldan og seltulítinn pólsjó (*e. Polar Water*) til suðvesturs meðfram austurströnd Grænlands. Fyrir norðaustan landið flytur Austur-Íslandsstraumurinn blöndu pól- og svalsjávar (*e. Artic Water*) meðfram landgrunnsbrúninni. Mynd 2 sýnir yfirborðstrauma við Ísland.

Norður-Atlantshafsstraumurinn flytur hlýjan og selturíkan Atlantssjó um Norður-Atlantshafið til Norðurhafa.³ Fyrir sunnan Ísland greinist hann í tvær greinar, sjá mynd 3 eftir Orvik og Niiler (2002). Önnur þeirra streymir til austurs og síðan norðausturs meðfram Bretlandseyjum, fer yfir Grænlands-Skotlands-hrygginn milli Hjaltlandseyja og Færeyja þaðan sem hún heldur áfram til norðausturs og fylgir svo vesturströnd Noregs norður í Barentshaf. Hin greinin flytur Atlantssjó til norðausturs yfir Suðurdjúp upp að suðurströnd Íslands. Við suðurströndina greinist hún í Irmingerstraum og aðra grein, Færeyjastraum (*Faroe Current*), sem fer yfir Íslands-Færeyjahrygginn, streymir til austurs fyrir norðan Færeyjar og til norðurs yfir Noregshaf. Fyrir vestan Ísland greinist Irmingerstraumurinn í tvær greinar, sjá mynd 2. Önnur fylgir Íslands-Grænlands-hryggnum til vesturs og streymir til suðvesturs meðfram Austur-Grænlandsstraumnum. Hin greinin streymir norður fyrir Vestfirði til austurs inn á Norðurmið.

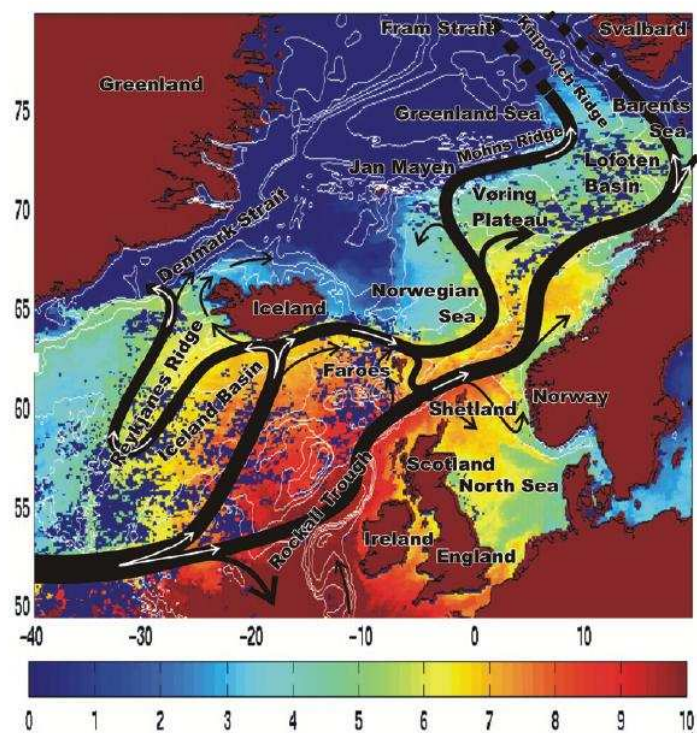
Austur-Grænlandsstraumurinn sem á upptök sín í Norður-Íshafinu flytur kaldan og seltulítinn pólsjó til suðurs meðfram austurströnd Grænlands. Austur-Íslandsstraumurinn á upptök sín í Austur-Grænlandsstraumnum og flytur ýmist með sér pólsjó eða svalsjó norðan úr Íslandshafi til suðausturs meðfram landgrunnsbrún Íslands og síðan austur meðfram Færeyjastraumnum. Austur-Íslandsstraumurinn er hluti af veikri rangsælis hringrás á milli Íslands og Jan Mayen sem er sýnd á mynd 4. Myndin er byggð á straumflöskumælingum og útreikningum á grundvelli eðlisþyngdardreifingar sem voru framkvæmdar fyrir og um miðja 20. öld (Unnsteinn Stefánsson, 1999). Myndir 2 og 3 byggja á nýjum mælingum og eru traustari heimild um yfirborðstrauma fyrir sunnan landið. Nýrri mælingar hafa hins vegar einnig stutt tilvist þessa hringstraums fyrir norðan landið (Poulain o.fl., 1996) sem Unnsteinn Stefánsson (1962) sýndi fram á með útreikningum byggðum á jarðsvigsjafnvægi (*e. geostrophic balance*) (Mortensen, 2004).

Flæði Atlantssjávar yfir hrygginn milli Skotlands og Grænlands hefur viðtæk áhrif á veðurfar, ástand sjávar og lífríki við og í Norðurhöfum (Steingrímur Jónsson og Héðinn Valdimarsson, 2005). Bæði vegna þess varma sem hann flytur með sér en einnig vegna þess háa hlutfalls af næringarsöltum sem hann inni-

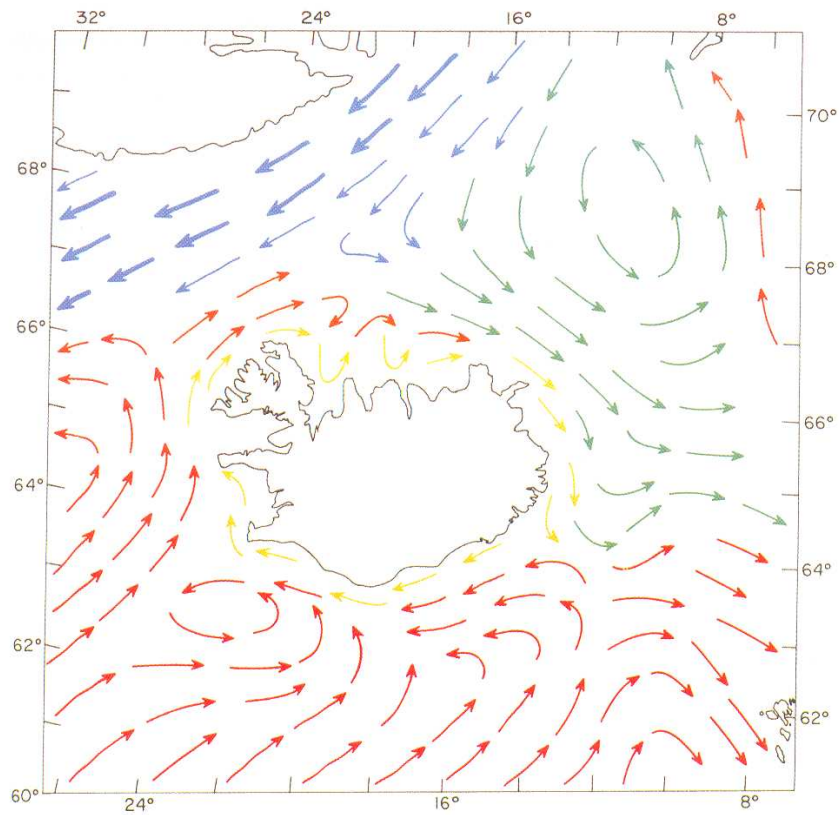
³Norðurhaf skiptist í þrjú hafsvæði: Íslandshaf, Noregshaf og Norður-Grænlandshaf (*e. Greenland Sea*). Hér er Barentshaf einnig talið til Norðurhafa.



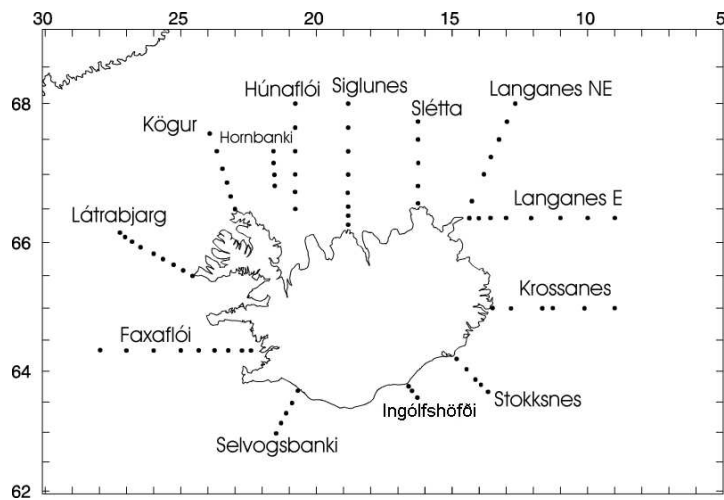
Mynd 2: Yfirborðsstraumar umhverfis Ísland. Myndir er byggð á gögnum frá rekduflum á 15 m dýpi. (Héðinn Valdimarsson og Svend Aage Malmberg, 1999)



Mynd 3: Yfirborðsstraumar sem flytja Atlantssjó um Norður-Atlantshaf og Norðurhöf. Myndin er byggð á gögnum frá rekduflum á 15 m dýpi. (Orvik og Niiler, 2002)



Mynd 4: Yfirborðsstraumar umhverfis Ísland. Rauður litur: Atlantssjór. Blár: Pólsjór. Grænn: Svalsjór. Gulur: Strandsjór. (Unnsteinn Stefánsson, 1999)



Mynd 5: Fastar stöðvar Hafrannsóknastofnunarinnar við Ísland. Stöðvarnar mynda snið út frá ströndinni sem heita eftir kennileitum á landi. (Hafrannsóknastofnunin, 2006)

heldur. Innflæðið er á þremur stöðum: Milli Skotlands og Færeyja, yfir Íslands-Færeyjahrygginn milli Íslands og Færeyja og yfir Íslands-Grænlandshrygginn milli Íslands og Grænlands. Heildarinnflæði yfir hrygginn hefur verið áætlað um 7-8 Sv ($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) og þar af er innflæðið til Norðurmiða með Irmingerstraumnum tæplega 1 Sv (Østerhus o.fl., 2005). Afgangurinn skiptist nokkuð jafnt á milli hinna greinanna tveggja. Breytileiki milli ára finnst í öllum greinunum en aðeins Irmingerstraumurinn hefur árstíðabundið innflæði sem er í lágmarki yfir vetrartímann. Vindþvingun er sterkust á veturna og á svæðinu fyrir norðan Ísland er hún að jafnaði norðlæg sem hamlar innflæði á Norðurmið. (Østerhus o.fl., 2005; Steingrímur Jónsson og Héðinn Valdimarsson, 2005)

Austan við landið mætast hlýjar og kaldar sjógerðir þegar sá hluti Atlants-sjávarins, sem kemur upp að suðurströndinni og streymir austur með henni, mætir Austur-Íslandsstraumnum. Á Grænlandssundi eru skilin milli sjógerða enn skarpari en fyrir austan landið, á skilunum milli Irmingerstraumsins og Austur-Grænlandsstraumsins (Unnsteinn Stefánsson, 1999). Þessi hitaskil norðvestur og suðaustur af landinu eru hluti af svokölluðum pólariskilum (*e. polar front*) sem skilja á milli hlýrri sjógerða Norður-Atlantshafsins og kaldari sjógerða Norðurhafa (Svend-Aage Malmberg og Héðinn Valdimarsson, 2003). Þessi skil liggja yfir Grænlands-Skotlandshryggnum og staðsetning þeirra tekur breytingum milli ára og árstíða. Ástand sjávar og lífskilyrðin í hafinu ákvarðast að miklu leyti af straumaskilum og hita- og seltudreifingu. Þar sem Ísland er nálægt þessum skilum hefur breytileg staðsetning þeirra veruleg áhrif á ástand sjávar umhverfis landið.

Innflæði Atlantssjávar með Irmingerstraumnum endurspeglast í ástandi sjávar fyrir norðan Ísland. Þegar það er mikið eru sjávarhiti og selta yfir meðallagi og þegar það er lítið eru sjávarhiti og selta undir meðallagi. Hrygningarstöðv-

ar þorsks eru fyrir sunnan land en stærstu uppeldisstöðvarnar eru fyrir norðan landið. Styrkur Irmingerstraumsins hefur þess vegna bein áhrif á afkomu þorsksstofnsins. (Hjálmar Vilhjálmsson, 1997)

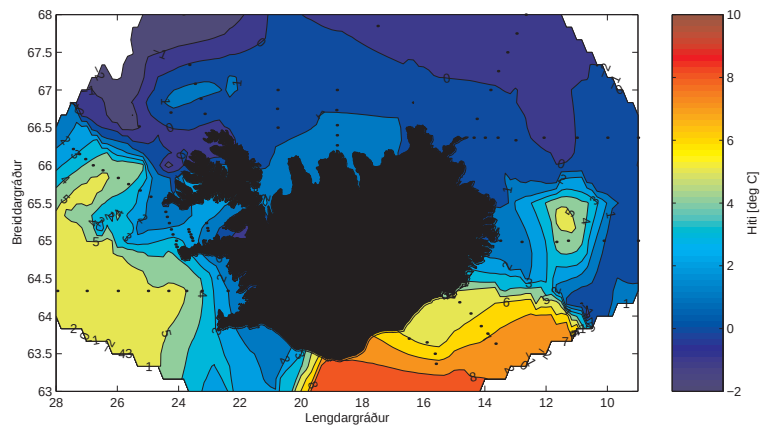
Aðstreymi kaldari sjógerða (pól- og svalsjávar) hefur einnig áhrif á ástand sjávar. Í köldum árum, þegar sjávarhiti er undir meðallagi, er aðstreymi kaldari sjógerða venjulega mikið. Lág selta í yfirborðslögum sjávar, sem fylgir þessum sjógerðum, veldur stöðugri yfirborðslögum og þannig verður minna um lóðréttu blöndun. Þetta flýtir fyrir þörungablóma og næringarefni eru fyrr uppurin á sumrin. Þar af leiðir eru heildaráhrif af aðstreymi kaldra sjógerða á lífríkið neikvæð. Í Atlantssjó er mikið af uppleystum næringarsöltum og aukið innstreymi Atlantssjávar hefur áhrif í þá átt að auka styrk þeirra á Norðurmiðum. (Unnsteinn Stefánsson og Jón Ólafsson, 1991)

2.1 Sjávarmælingar og brúun þeirra

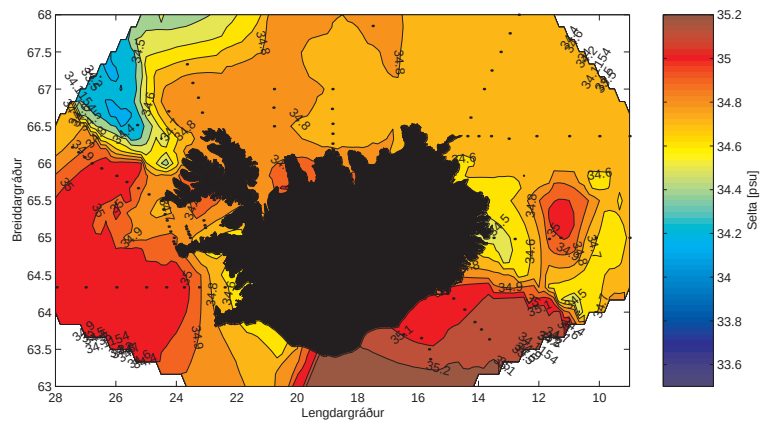
Reglulegar mælingar á hita og seltu umhverfis Ísland hafa farið fram síðan um 1950. Fyrstu árin fóru þær fram að vori eða snemma sumars í tengslum við síldarleit á miðum fyrir norðan og norðaustan landið (Jón Jónsson, 1990). Í fyrstu var það Fiskideild Háskólans sem sá um mælingarnar en 1965 var Hafrannsóknastofnun stofnuð og hefur hún annast mælingarnar síðan. Í kringum 1970 eignaðist stofnunin rannsóknaskipin *Árna Friðriksson* og *Bjarna Sæmundsson* (Svend-Aage Malmberg, 2003) og síðan hafa þessar mælingar farið fram nær ársfjórðungslega: Í febrúar-mars, maí-júní, ágúst-september og október-nóvember. Mælingarnar fara fram á föstum sniðum út frá ströndinni sem heita eftir kennileitum á landi, sjá mynd 5. Í tímans rás hefur staðsetning sniðanna tekið nokkrum breytingum. Frá árinu 1983 hefur staðsetning þeirra verið eins og sýnt er á myndinni (Unnsteinn Stefánsson og Jón Ólafsson, 1991). Frá 1990 hefur öflun sjávarmælinga og vinnsla þeirra verið með þeim hætti sem hún er í dag. Á hverri stöð eru hiti og selta mæld frá yfirborði niður á botn. Mælingarnar eru geymdar í gagnagrunni Hafrannsóknastofnunarinnar sem meðaltal hita og seltu yfir eins metra dýptarbil. Mikilvægi þessara gagna er óumdeilt því þau er meðal annars hægt að nota til að fylgjast með langtímabreytingum í hafinu.

Sjávarmælingar Hafrannsóknastofnunarinnar eru ekki jafn dreifðar umhverfis landið. Til hagræðingar við útreikninga og samanburð við reiknilíkön er þörf á að færa mælingarnar yfir á reglulegt net. Til að bera sjávarmælingar frá föstum sniðum saman við útkomur úr haflíkani fyrir hafsvæðið umhverfis Ísland var ráðist í það verkefni að finna ferli til að brúa mælingarnar yfir á þrívítt net. Netsett gögn er hægt að bera saman við útkomur úr reiknilíkönnum og nota til að teikna útbreiðslu hita og seltu á mismunandi tímum.

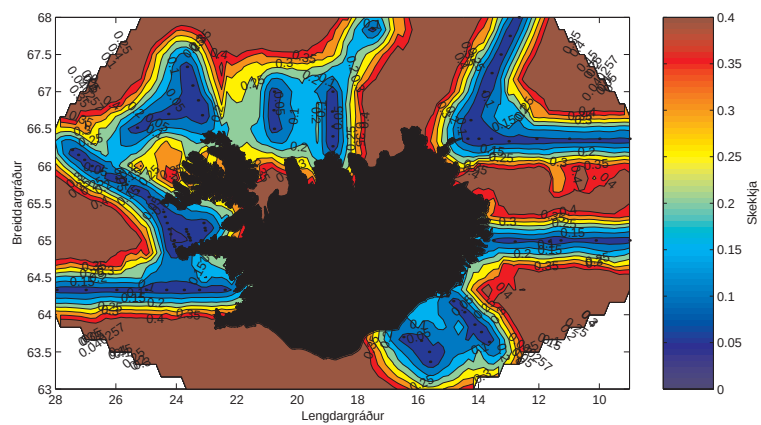
Brúunarforritið *Oax* sem var hannað við Haffræðistofnunina í Bedford (Bedford Institute of Oceanography) er notað til að brúa sjávarmælingarnar. Brúunaraðferðin byggir á viðfangsgreiningu (*e. objective analysis*) (Hendry og He, 1996) en sú aðferð grundvallast á því að gildi í brúunarpunktum sé hægt að reikna með tölfræðilegum aðferðum út frá mæligildum. Gildi í brúunarpunkti



(a) hiti ($^{\circ}\text{C}$)



(b) selta (psu)



(c) skekka

Mynd 6: Sjávarhiti (a) og selta (b) á 50 m dýpi í vetrarleiðangri Hafrannsóknastofnunarinnar í febrúar-mars 1995 ásamt reiknaðri skekkju(c).

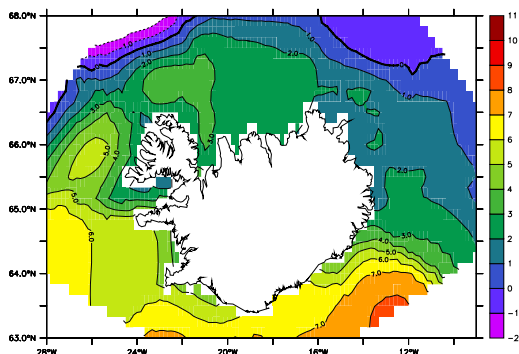
er fundið með því að taka vegið meðaltal af nálægum mælingum. Vægi mælinganna er fundið með því að lágmarka skekkju sem metin er út frá samvikafalli (*e. covariance function*) mælisviðsins. Aðferðin er háð því að tölfræðilegir eiginleikar mæligagnanna séu þekktir eða fyrir liggi gott mat á þeim. Nánar er fjallað um brúunina í viðauka A. (Bretherton o.fl., 1976; Sigríður Sif Gylfadóttir, 2002; Sæunn Halldórsdóttir o.fl., 2005)

Mynd 6 sýnir brúunargildi sem eru reiknuð út frá mælingum úr vetrarleiðangri Hafrannsóknastofnunarinnar 1995. Mynd 6(a) sýnir brúunargildi fyrir hita, mynd 6(b) brúunargildi fyrir seltu og mynd 6(c) sýnir skekkju sem brúunarforritið reiknar fyrir hvern brúunarpunkt. Skekkjan sem er reiknuð er aðferðarskekkja að viðbætti fastri mæliskekkju. Mæliskekkjunni var gefið gildið 0.1 sem er ágiskun en ekki áreiðanlegt mat og verður skekkjumatið að skoðast út frá því. Þrátt fyrir þetta dregur myndin sem sýnir skekkjuna fram þau svæði þar sem brúunargildi eru ekki mjög áreiðanleg eins og þar sem langt er á milli mælistöðva. Til dæmis er ekki hægt að taka svo mikið mark á gildum við suðvesturströndina þar sem mælingar vantar frá Selvogsbanka, sjá mynd 6(c).

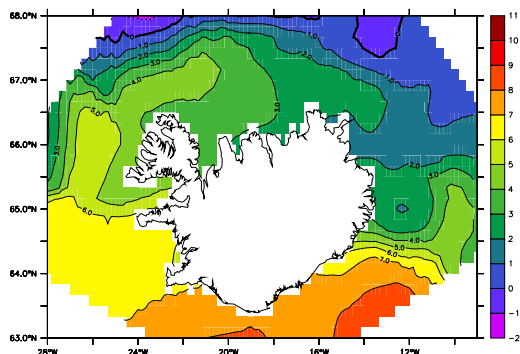
Myndir 7 og 8 sýna meðaltöl brúunargilda úr leiðöngrum Hafrannsóknastofnunarinnar á árunum 1990-2000. Myndirnar sýna hita og seltu á 50 m dýpi á mismunandi árstímum. Gildin sem eru sýnd á myndum 7(a) og 8(a) eru fundin með því að taka meðaltal brúunargilda sem eru reiknuð út frá mælingum í vetrarleiðöngrum. Gildin á myndum 7(b) og 8(b) eru fundin með því að taka meðaltöl úr vorleiðöngrum, myndir 7(c) og 8(c) sýna meðaltöl úr sumarleiðöngrum (ágústleiðöngrum) og 7(d) og 8(d) sýna gildi úr haustleiðöngrum. Meðaltölin eru fundin út frá mismunandi fjölda af leiðöngrum, sjá nánar í útskýringum við myndirnar.

Árstíðasveifla í hita og seltu kemur fram á myndunum. Á mynd 7 sést að við suðurströndina er sjávarhiti um 7°C. Þar er hitinn mestur á sumrin þegar hann fer upp fyrir 9°C og lægstur á veturna þegar hann fer niður í 5-6°C. Við norðurströndina er hiti að sumarlagi í kringum 5-6°C og á veturna fer hitinn niður fyrir 3°C.

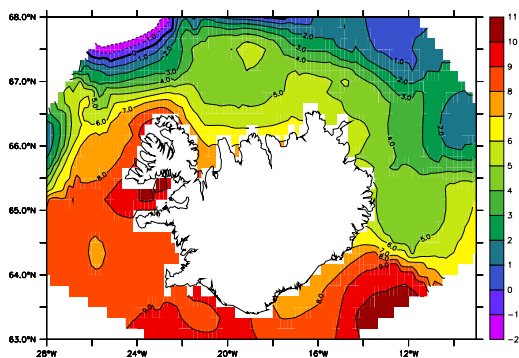
Skilin á Grænlandssundi koma greinilega í ljós á myndunum. Merki um pólsjó sjást efst til vinstri á myndunum (fyrir norðvestan landið). Merki um Atlantssjó sjást einnig nær landi. Innstreymi Atlantssjávarins með Irmingerstraumnum er mismikið eftir árstíðum. Það er í lágmarki yfir vetrartímann og sést það á útbreiðslu hita og seltu út af Vestfjörðum. Á vorin nær tunga af hlýjum sjó ($\geq 4^{\circ}\text{C}$) norður fyrir Vestfirði sem gefur til kynna aukið innstreymi Atlantssjávar. Á sumrin er útbreiðsla hlýsjávarins í hámarki fyrir norðan land.



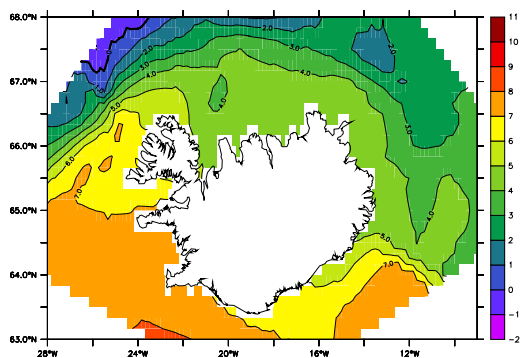
(a) Vetrarleiðangrar (febrúar-mars)



(b) Vorleiðangrar (maí-júní)

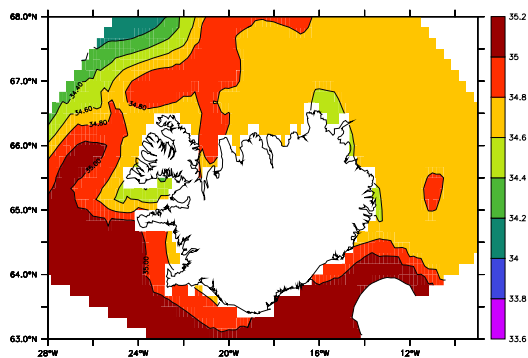


(c) Sumarleiðangrar (ágúst-september)

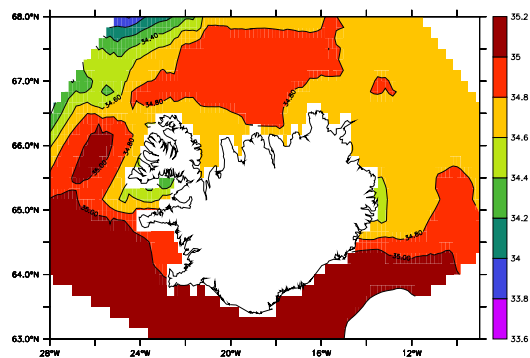


(d) Haustleiðangrar (október-nóvember)

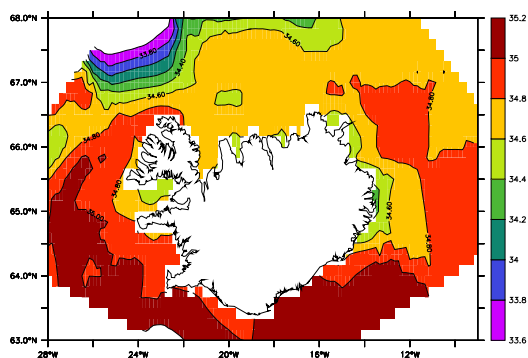
Mynd 7: Netsett gögn sem sýna hita ($^{\circ}\text{C}$) á 50 m dýpi á mismunandi árstímum. Gögnin eru frá 1991-1993, 1995-1996 og 1998-2000.



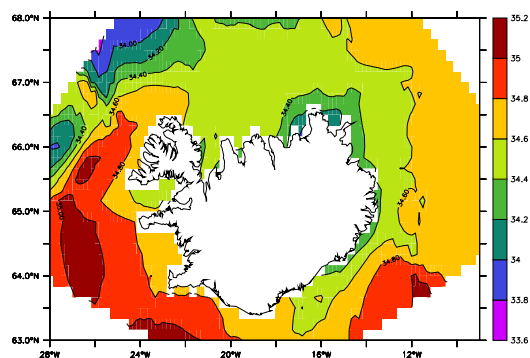
(a) Vetrarleiðangrar (febrúar-mars)



(b) Vorleiðangrar (maí-júní)



(c) Sumarleiðangrar (ágúst-september)



(d) Haustleiðangrar (október-nóvember)

Mynd 8: Netsett gögn sem sýna seltu á 50 m dýpi á mismunandi árstímum. Gögnin eru frá 1991, 1992, 1993 og 1995.

3 Haflíkanið MOM4 og staðalkeyrslur

Í rannsókn þessari er notast við haflíkanið MOM4 sem er nýjasta útgáfa MOM (*Modular Ocean Model*) líkansins. Líkanið er þróað af vísindamönnum við GFDL (*Geophysical Fluid Dynamics Laboratory*) sem er rannsóknastofnun á vegum Bandarísku veðurstofunnar (NOAA).

MOM byggir á grunni reiknilíkana (*e. numerical models*) sem voru þróuð á sjöunda til níunda áratugi síðustu aldar af þeim Kirk Bryan og Mike Cox. Árið 1984 var frumútgáfa MOM gefin út alþjóðlega með opnum aðgangi að forritum og aðferðum sem líkanið byggði á. Fyrsta útgáfa MOM, MOM1, kom út árið 1991 og byggði á þessari frumútgáfu (á Cox-kóðanum). Fjórða útgáfa MOM, MOM4, kom út árið 2003/2004 og var sérstaklega hönnuð til að keyra á tölvueyki (*e. parallel computers*) sem nú á dögum er mikið notað til að keyra líkön í veður- og haffræði. Líkanið er skrifað í Fortran90 og er byggt upp sem kerfi af forritshlutum (*e. modules*). Í hverjum forritshlut er útfærð aðferð eða aðferðir til að reikna út eðlisþætti og aðra eiginleika sem þörf er á við útreikning á hafhringrásinni. (Griffies o.fl., 2004)

Í eftirfarandi lýsingu á líkaninu verður að mestu stuðst við handbók um MOM4 eftir Griffies o.fl.(2004) en einnig má benda á handbók um MOM3 eftir Pacanowski og Griffies (2000) en þar má í mörgum tilvikum finna ítarlegri útskýringar á aðferðum sem eru einnig notaðar í MOM4.

3.1 Grunnjöfnur

Til að lýsa flæði og breytingum á ástandi sjávar þarf eftirfarandi fimm jöfnur (Gill, 1982):

- Massavarðveislujöfnu (*e. mass conservation equation*)

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot (\mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

þar sem D/Dt er virkinn $\partial/\partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla$, ρ er eðlismassi og $\mathbf{u} = (u, v, w)$ er straumur.

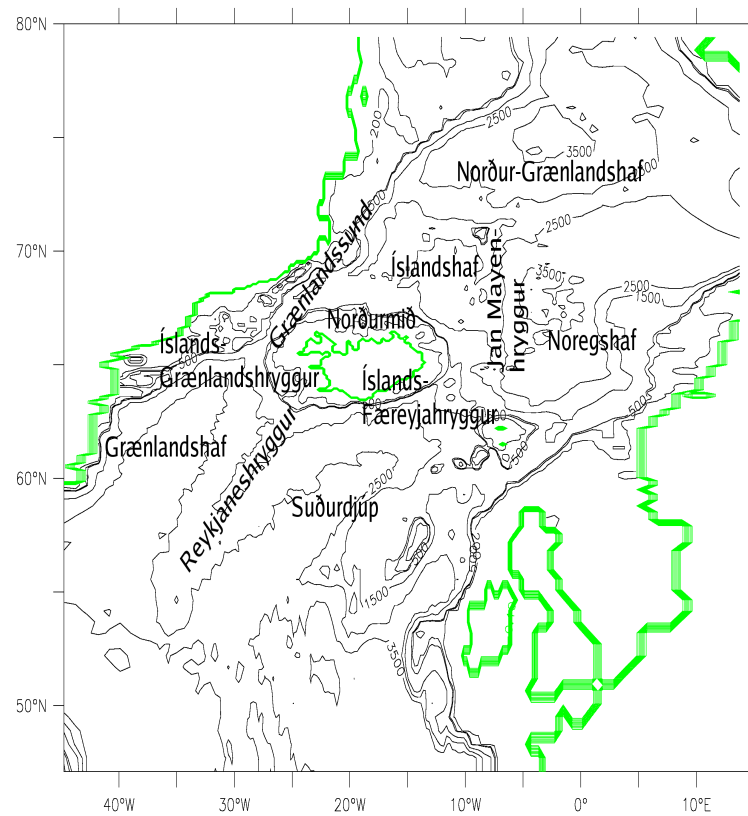
- Hreyfijöfnu (*e. momentum equation*)

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - g\mathbf{k} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} \quad (2)$$

þar sem $\boldsymbol{\Omega}$ er hornhraðavigur jarðar, p er þrýstingur, g er þyngdarhröðun og $\nu = \mu/\rho$ er seigjustuðull (*e. kinematic viscosity*) sem er háður ástandi vökvans en yfirleitt er hægt að líta á sem fasta (Gill, 1982).

- Varmajöfnu (*e. energy equation*)

$$\rho T c_p(p_r, \theta) \frac{1}{\theta} \frac{D\theta}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T - F^{rad}) + Q_H \quad (3)$$



Mynd 9: Líkansvæðið og botnlögun eins og hún kemur fram í líkaninu ásamt helstu kennileitum. Svæðið nær frá $46^{\circ}48' N$ til $80^{\circ}18' N$ og frá $45^{\circ}15' W$ til $15^{\circ}15' E$. Á bilinu 3500-500 m eru jafndýptarlínur sýndar með 1000 m millibili, jafndýptarlínur sem sýna 200 m og 400 m eru einnig sýndar.

þar sem T er hitastig, c_p er eðlisvarmi (*e. specific heat*), p_r er viðmiðunarþrýstingur, θ er mættishiti, k er varmaleiðni (*e. thermal conductivity*), F^{rad} er varmageislun (*e. radiative flux*) og Q_H er varmauppspretta.

- Jafna fyrir seltu (*e. concentration equation*)

$$\rho \frac{Ds}{Dt} = \nabla \cdot (\rho \kappa_D \nabla s) \quad (4)$$

þar sem s er selta og κ_D er sveimstuðull (*e. rate of diffusion*).

- Og ástandsjöfnu (*e. equation of state*)

$$\rho = \rho(p, s, \theta) \quad (5)$$

Í sjónum eru liðir sem lýsa hraðabreytingum í lóðrétta stefnu venjulega mjög litlir, nema þeir liðir sem lýsa þyngdarhröðun og hröðun vegna þrýstingsbreytinga (Pond og Pickard, 1983). Ef þessum liðum er sleppt þá er vökvinn í vökvastöðujafnvægi (*e. hydrostatic balance*). Þá verður liður hreyfijöfnunnar sem lýsir hreyfingum í lóðrétta stefnu:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g$$

Ef gert er ráð fyrir að eðlismassabreytingar séu litlar, þannig að $\rho = \rho_0 + \Delta\rho$ og $\Delta\rho \sim 0$, þá er hægt að líta á eðlismassa sem fasta, í þeim liðum hreyfijöfnunnar þar sem hann kemur fyrir, nema þegar hann er margfaldaður með þyngdarhröðuninni. Þessi nálgun kallast Boussinesq-nálgun (Pond og Pickard, 1983). Með þessari nálgun verða þeir liðir hreyfijöfnunnar sem lýsa hreyfingu í lárétta stefnu:

$$\begin{aligned} \frac{Du}{Dt} - fv &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \\ \frac{Dv}{Dt} + fu &= -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + A_y \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \end{aligned}$$

Þar sem $f = 2\Omega \sin \lambda$ er lóðréttur þáttur hornhraðavigursins 2Ω , Ω er hornhraði jarðar og λ er breiddargráða. Efri jafnan ætti einnig að innihalda liðinn f^*w , þar sem $f^* = 2\Omega \cos \lambda$ er láréttur þáttur hronhraðavigursins, en þar sem lóðréttur hraði, w , er lítill samanborið við hraða í lárétta stefnu (Pond og Pickard, 1983) er hægt sleppa þessum lið.

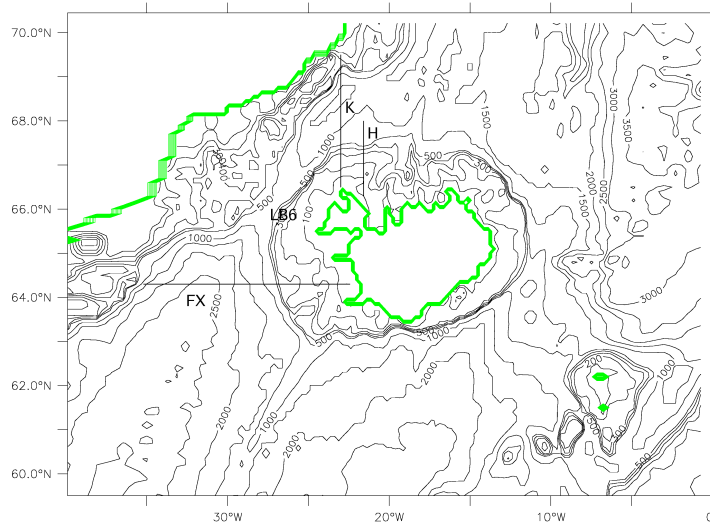
Haflíkanið MOM4 er útfært til að leysa grunnjöfnurnar fimm. Notuð er forsenda um að vökvinn sé í vökvastöðujafnvægi og Boussinesq-nálgun. Einfölduðu grunnjöfnurnar sem líkanið leysir er hægt að skrifa á eftirfarandi formi.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{D\mathbf{u}_h}{Dt} + (f + M)\mathbf{k} \times \mathbf{u}_h = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \mathbf{F}^{\mathbf{u}_h} \quad (7)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (8)$$

$$\frac{DT_*}{Dt} = -\nabla \cdot \mathbf{F} + S_* \quad (9)$$



Mynd 10: Botnlögun eins og hún kemur fram í líkaninu. Á bilinu 3500-500 m eru jafndýptarlínur sýndar með 500 m millibili en með 100 m millibili á bilinu 0-500 m. Líkanið nær yfir stærra svæði og er það sýnt á mynd 9. FX: Faxaflóasnið. H: Hornbankasnið. K: Snið sem liggur í norður frá Kögri. LB6: Stöð 6 á Látrabjargssniði.

Jafna 6 er jafna um massavarðveislur (jafna 1) eftir að Boussinesq-nálgun hefur verið gerð. Jöfnur 7 og 8 eru einfaldanir á hreyfijöfnunni (jöfnu 2), þar sem $u_h = (u, v)$ er hraði í lárétta stefnu, $M = u \tan \lambda / R$ og R er radíus kúlu sem hefur sama rúmmál og jörðin ($R = 6.371 \times 10^6$ m). Þessi þáttur er afleiðing af því að jörðin er kúla en þau hnit sem reiknað er í liggja í sléttu plani sem liggur í gegnum punktinn (λ, ϕ) , þar sem λ er breiddargráða og ϕ er lengdargráða (Griffies o.fl., 2004). $\mathbf{F}^{uh}$ er flæði og núningur. Hægt er að skrifa varmajöfnuna (jafna 3) og jöfnu fyrir seltu (jafna 4) á sama formi (jafna 9), þá er $T_* = \theta, s$ (mættishiti eða selta), $\mathbf{F}$ er flæði og S_* er uppspretta.⁴ Þetta eru þær jöfnur sem að líkanið MOM4 grundvallast á auk ástandsjöfnunnar (jöfnu 5) (Griffies o.fl., 2004).

3.2 Uppsetning staðalkeyrslna

Árið 2001 hófst vinna við verkefnið *Líkanareikningar á breytileika í hafi*. Verkefnið var styrkt af Rannsóknamiðstöð Íslands (Rannís). Þátttakendur í verkefninu

⁴Jöfnu 9 er hægt að nota sem almenna jöfnu fyrir styrk snefilefnis (*e. tracer*) í vökvanum, þá er T_* styrkur snefilefnisins (þ.e. massi efnis í hverri massaeyningu af vatni) og S_* er uppspretta eða niðurfall (Griffies o.fl., 2004).

komu frá Háskóla Íslands, Háskólanum á Akureyri, Veðurstofunni og Hafrannsóknastofnuninni (Halldór Björnsson o.fl., 2006). Haflíkanið MOM4 var sett upp á tölvueyki og notað til að reikna strauma við Ísland. Til að kvarða líkanið og aðlagja það að íslensku hafsvæði var sett upp svokölluð *staðalkeyrsla* þar sem líkanið var keyrt með meðalárstíðasveiflu. Yfirborðsþvingun (þ.e. jaðarskilyrði við yfirborð) var unnin úr gögnum frá NCEP (National Center for Environmental Prediction) sem er stofnun á vegum Bandarísku veðurstofunnar (NOAA)⁵ og yfirborðsgögnum úr ERA40 gögnum frá Evrópska reiknisetrinu í veðurfræði (ECMWF)⁶. Í fyrstu var unnið með opin jaðarskilyrði (*e. open boundary condition*) og upphafsskilyrði unnum úr gögnum úr Levitus safninu. Árið 2005 var byrjað að keyra líkanið með jaðar- og upphafsskilyrðum úr OCCAM líkaninu. Nokkrar útfærslur eru til af staðalkeyrslunni. Þær tilraunir sem fjallað er um í þessari ritgerð byggja allar á staðalkeyrslu með blönduðum jaðarskilyrðum þar sem hluti jaðarskilyrða er úr Levitus gagnasafninu og hluti úr OCCAM líkaninu.

Levitus gögnin (NOAA/OAR/ESRL PSD, 1998) koma frá CDC (*Climate Diagnostic Center*) sem er stofnun á vegum Bandarísku veðurstofunnar. Þau eru úr safni sjávarmælinga, hita og seltu, frá heimshöfunum sem stofnunin hefur tekið saman og brúað yfir á þrívítt net. Mælingarnar eru misdreifðar, sérstaklega skortir mælingar frá Norðurhöfum einkum og sér í lagi frá Norður-Grænlandshafi (Einar Örn Ólason, 2006).

Haflíkanið OCCAM (*Ocean Circulation and Climate Advanced Model*) var þróað við Hafræðisetrið í Southampton (*Southampton Oceanography Institute*) (Coward og de Cuevas, 2005). Gögnin sem eru notuð í þessari rannsókn eru mánadarmæltöl reiknuð út frá niðurstöðum líkansins fyrir tímabilið 1985-2003. Í heildina eru reikniniðurstöður OCCAM líkansins góðar fyrir hafsvæðið umhverfis Ísland (Einar Örn Ólason, 2006). Massaflutningur með Norður-Atlantshafsstraumnum og Austur-Grænlandsstraumnum er í samræmi við áætluð gildi. Austur-Íslandsstraumurinn kemur skýrt fram og sömuleiðis hringrásin á Íslandshafi. Irmingerstraumurinn er of sterkur í líkaninu (Einar Örn Ólason, 2006) og afleiðing þess eru of há seltugildi á Grænlandshafi (*e. Irminger Sea*).

Mynd 9 sýnir svæðið sem líkanið nær yfir. Það nær frá 46°48' N til 80°18' N í norður-suðurstefnu (y-stefnu) og frá 45°15' W til 15°15' E í austur-vestur stefnu (x-stefnu). Lárétt upplausn líkansins er breytileg eftir fjarlægð frá jaðrinum. Við jaðarinn er upplausnin 1 lengdargráða x 0.6 breiddargráða. Við Ísland, á svæðinu 60°57' N til 68°33' N og 29°00' W til 9°00' W, er upplausnin 0.25 lengdargráða x 0.1 breiddargráða. Frá jaðrinum og að svæðinu í kringum Ísland breytist upplausnin línulega. Upp við landið er upplausnin því um 7 km x 10 km en við jaðrana er hún um 70 km x 65 km (við syðri jaðarinn) og 20 km x 65 km (við nyrðri jaðarinn). Botndýpi er úr OCCAM 0.1° netinu sem er frá Hafræðisetrinu í Southampton. Mynd 10 sýnir botnlögun á líkanssvæðinu eins hún kemur fram næst Íslandi. Dýpi í líkaninu er frá 0 m niður í tæplega 5000 m og skiptist það í

⁵National Oceanic and Atmospheric Administration

⁶European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

17 dýptarbil. Frá 0 m niður í 50 m er hvert dýptarbil 10 m en frá 50 m niður í tæplega 5000 m breytast þau línulega úr rúmlega 10 m í tæplega 800 m.

Upphafsskilyrði eru unnin með hita- og seltugögnum úr Levitus gagnasafninu og OCCAM líkaninu. Línan sem nær frá norðvestur horni líkansvæðisins ($\sim 80^\circ\text{N}$, 45°W) til suðaustur horns svæðisins ($\sim 47^\circ\text{N}$, 15°E) er notuð til að skipta svæðinu. Fyrir sunnan línuna eru Levitus gögnin notuð en fyrir norðan línuna eru OCCAM gögnin notuð. Við línuna er notuð línuleg brúun til að jafna út skiptinguna á milli gagnanna. Þar sem líkanið er upphafsstillt í janúar eru gögn fyrir janúar úr báðum söfnum notuð.

Jaðarskilyrði (fyrir ytri jaðar) koma úr OCCAM líkaninu og úr Levitus gagnasafninu. Skiptingin er framkvæmd á sama hátt og gert er fyrir upphafsskilyrðin. Jaðarskilyrðin breytast með tíma svo mánaðarmeðaltöl eru notuð. Þessi gögn eru notuð til að stjórna eðlismassasviði á jöðrunum. Hita- og seltugildi eru leiðrétt eða *dempuð* að þeim gildum sem jaðarskilyrðin segja til um. Það er gert með með því að bæta við uppsprettu eða niðurfalli í yfirborðslaginu (Pacanowski og Griffies, 2000):

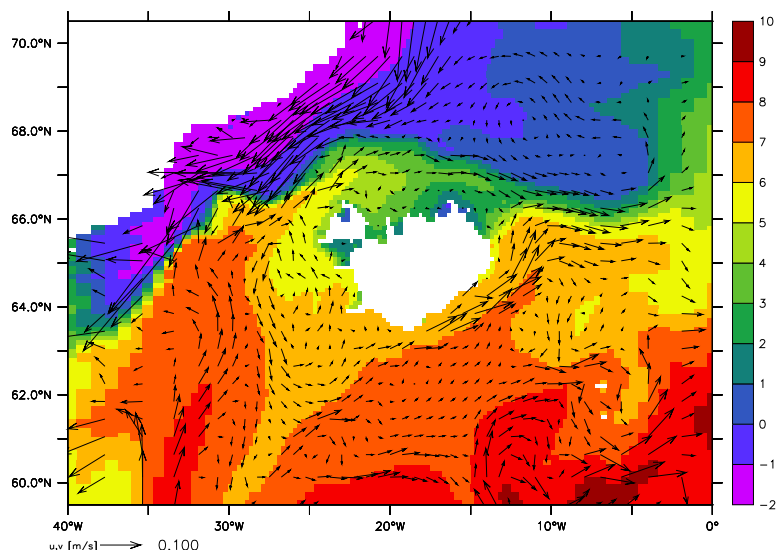
$$S_* = \gamma (T_* - T'_*)$$

Þar sem $T_* = \theta, s$ (mættishiti eða selta) í yfirborðslaginu og T'_* er hiti eða selta í jaðarskilyrðum. Fyrir hita er þetta gert með því að bæta við varmaflæði við yfirborð (Einar Örn Ólason, 2006). Fyrir seltu er bætt við ferskvatnsflæði við yfirborð. Dempunarstuðullinn γ er gefinn með (Einar Örn Ólason, 2006)

$$\gamma(x_1, x_2) = \min\left(\sum_{j,i=1}^2 \gamma_0 \exp\{c_j^i[x_j^i - x^i]\}, \gamma_{\max}\right) \quad (10)$$

og ef $\gamma < \gamma_{\min}$ þá er $\gamma = 0$. Þar sem $\gamma_0 = 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, $\gamma_{\min} = 3 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1}$, $\gamma_{\max} = 2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, $c_1^1 = -c_1^2 = 1/1^\circ$, $x_1^1 = 41^\circ\text{W}$, $x_1^2 = 1^\circ\text{E}$, $c_2^1 = -c_2^2 = 2/1^\circ$, $x_2^1 = 56^\circ\text{N}$ og $x_2^2 = 74^\circ\text{N}$. Dempunarstuðullinn hefur gildið $\gamma_{\max}$ við ytri jaðar. Á rammanum sem er gefinn með 41°W - 1°E og 56 - 74°N byrjar dempunin að minnka. Fyrir innan ramman sem er gefinn með 35 - 5°W og 59 - 71°N er engin dempun.

Jaðarskilyrði við yfirborð (þvingun) eru: Vindspenna, hiti, selta, úrkoma og uppgufun. Hiti og vindspenna koma úr ERA40 lofthjúpsgreiningu ECMWF (Uppala o.fl., 2005). Úrkoma og uppgufun koma úr NCEP greiningu NOAA (NOAA/OAR/ESRL PSD, 2005). Einar Örn Ólason (2006) vann mánaðarmeðaltöl upp úr þessum gögnunum fyrir tímabilið 1958-2002. Mánaðarmeðaltöl seltu eru úr Levitus gagnasafninu og OCCAM líkaninu, með sömu skiptingu og í upphafs- og jaðarskilyrðum.

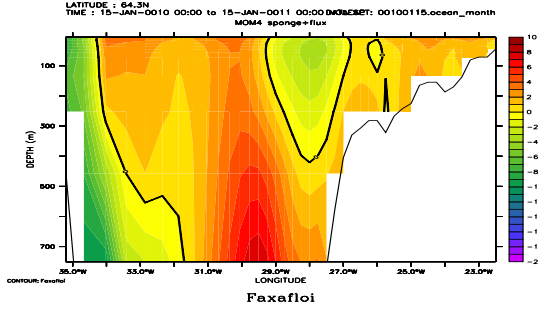


Mynd 11: Staðalkeyrsla, flæðið er þvingað með meðalárstíðasveiflu. Straumur (m/s) og hiti ($^{\circ}\text{C}$) á 50 m dýpi. Örin fyrir neðan myndina sýnir straumvigur sem hefur stærðina 10 cm/s.

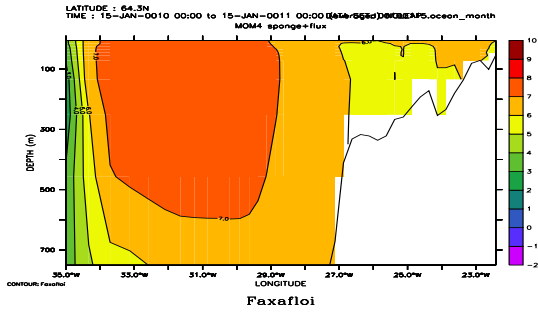
3.3 Niðurstöður staðalkeyrslna

Mynd 11 sýnir ársmeðaltal straums og hita á 0-50 m dýpi þegar líkanið hefur verið keyrt í 10 líkanár. Áhrifa frá jaðarskilyrðum gætir við eystri og vestri jaðra svæðisins. Milli 35°W og 5°W er engin dempun en milli 40°W og 5°W er dempunin gefin með jöfnu 10. Þetta getur haft áhrif á strauma, sérstaklega eftir lengdarbaugunum 35°W og 5°W , þar sem þrýstistraumar geta skapast vegna eðlismassamuns á gildum sem eru dempuð að jaðarskilyrðum og gilda sem eru ekki dempuð. Myndina er hægt að bera saman við mynd 2 til að dæma um hversu vel yfirborðstraumar koma fram í staðalkeyrslunni. Í straumum á íslenska landgrunninu er mesta misræmið í innstreymi Atlantssjávar til Norðurmiða og á staðsetningu straumskila fyrir austan landið. Hér á eftir verður fjallað nánar um í hverju misræmið er fólgið.

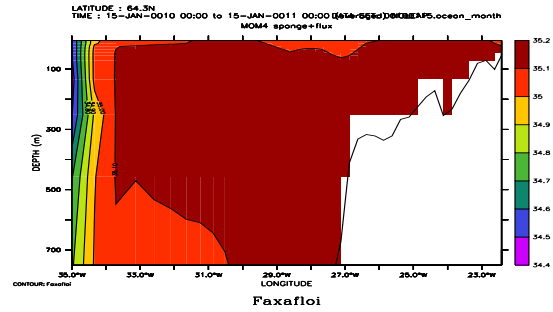
Irmingerstraumurinn streymir til norðurs fyrir vestan Reykjaneshrygginn. Hann greinist fyrir vestan Ísland. Önnur greinin streymir til norðausturs yfir Grænlandssund og síðan norður með landgrunnsbrún Íslands. Hin greinin streymir til vesturs og síðan suðvesturs og myndar hluta af rangsælis hringrás á Grænlandshafi. Grein úr Norður-Atlantshafsstraumnum streymir til norðausturs fyrir austan Reykjaneshrygginn. Við suðurströnd Íslands streymir hluti hennar til vesturs og síðan til norðurs með Vesturlandi en stærsti hluti hennar streymir til austurs.



(a) v (cm/s)



(b) t (°C)

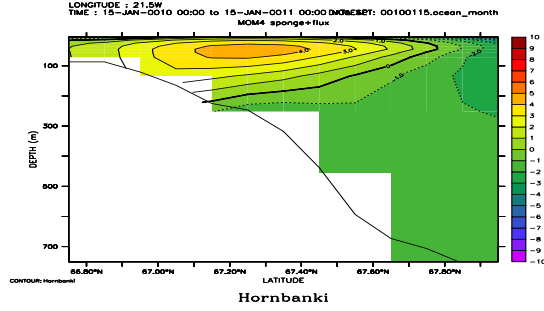


(c) s (psu)

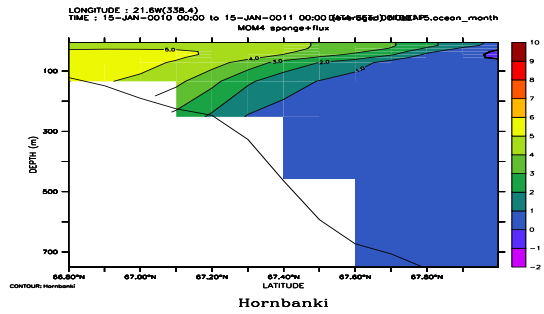
Mynd 12: (a) Straumur í norður-suður stefnu á Faxaflóasniði. (b) Sjávarhiti á Faxaflóasniði. (c) Selta á Faxaflóasniði. Myndirnar sýna ársmeðaltöl. Straumur með jákvætt formerki er til norðurs. Staðsetning sniðsins sést á mynd 10.

Við þessa grein bætist straumur sem á upptök sín við þann stað þar sem Irmingerstraumurinn streymir yfir Íslands-Grænlandshrygginn. Þessi straumur fylgir landgrunnsbrúninni til suðurs og sameinast síðan fyrrnefndri grein fyrir austan Reykjaneshrygginn. Í staðalkeyrslunni er enginn straumur sem fylgir Reykjaneshryggnum frá suðurströndinni til suðurs (austan megin við hann) og svo til norðurs (vestan megin við hann) eins og sést á myndunum í kafla 2. Straumur við ströndina, sem liggur til vesturs yfir Reykjaneshrygginn og fylgir vesturströndinni til norðurs, er einnig lítill.

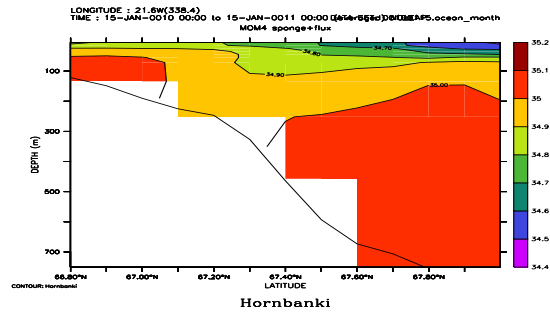
Austur-Grænlandsstraumurinn kemur inn á svæðið við nyrðri jaðar þess og streymir meðfram austurströnd Grænlands til suðurs og suðvesturs. Fyrir norðaustan Ísland kemur fram veik rangsælis hringrás. Hringrásirnar eru raunar tvær og koma þær fram austan og vestan megin við Jan Mayen-hrygginn. Utan með þessari hringrás, milli hennar og Íslands, kemur fram veikur Austur-Íslandsstraumur en upptök hans í Austur-Grænlandsstraumnum koma ekki vel fram. Fyrir austan landið mætir Austur-Íslandsstraumurinn greininni sem liggur



(a) u (cm/s)



(b) t (°C)



(c) s (psu)

Mynd 13: (a) Straumur í austur-vestur stefnu á Hornbankasniði. (b) Sjávarhiti á Hornbankasniði. (c) Selta á Hornbankasniði. Myndirnar sýna ársmeðaltöl. Straumur með jákvætt formerki er til austurs. Staðsetning sniðsins sést á mynd 10.

með suðausturströndinni. Hitaskilin milli hlýju og köldu sjógerðanna eru skörp en staðsetning þeirra er mun norðar en sést á mynd 2. Straumskilin liggja beint austur af landinu en fylgja ekki Íslands-Færeyjahryggnum eins og sést á myndinni.

Mynd 12 sýnir ársmeðaltal straums í norður-suðurstefnu ásamt sjávarhita og seltu á þversniði sem liggur út frá Faxaflóa. Á myndinni sést veðurstraumur til norðurs á landgrunninu. Þessi straumur sést einnig á mynd 2. Yfir landgrunnsbrúninni er straumur til suðurs en hann á upptök sín á Grænlandssundi. Hvorki mælingar né reynsla styðja tilvist hans. Immingerstraumurinn er allur fyrir utan landgrunnsbrúnina. Vestast sést straumur til suðurs og af hita- og seltugildum sést að hann flytur að megninu til Atlantssjó. Það er sú grein Irmingerstraumsins sem greinist fyrir vestan Ísland og fylgir svo landgrunnsbrún Grænlands aftur til suðurs. Vestast á sniðinu lækka hita- og seltugildi mikið á stuttum kafla og þar eru skil milli Irmingerstraumsins og Austur-Grænlandsstraumsins.

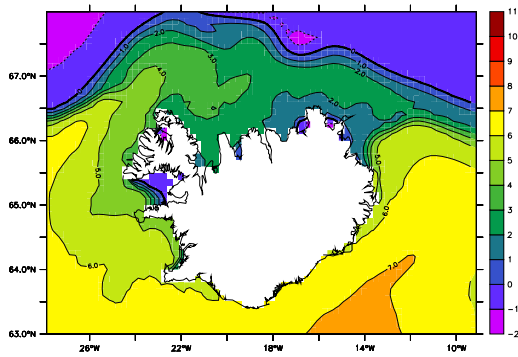
Mynd 13 sýnir ársmeðaltal straums í austur-vesturstefnu ásamt sjávarhita og

seltu á þversniði sem liggur við Hornbanka. Kjarninn í streyminu til austurs (innstreymi á Norðurmið) er á milli 67°N og 67.6°N . Á milli 67.6°N og 67.8°N sést straumur til vesturs í yfirborðinu. Mælingar frá Hornbanka hafa sýnt að kjarninn í innflæðinu er nær landi og greinileg skil eru á milli straums til austurs og vesturs á $67^{\circ}20'\text{N}$ (67.3°N) (Steingrímur Jónsson og Héðinn Valdimarsson, 2005). Hita- og seltugildi sýna að hlutfall Atlantssjávar er mest við ströndina og norður að $67^{\circ}30'\text{N}$, niður á 200 m dýpi. Í kjarna innstreymisins er því hlufall Atlantssjávar mikið.

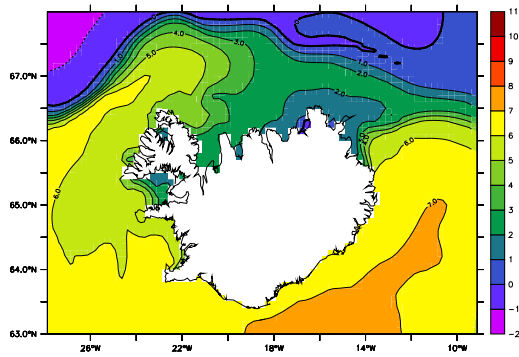
Mynd 14 á blaðsíðu 22 sýnir hita í staðalkeyrslunni á miðunum við Ísland. Hún sýnir hita á 0-50 m dýpi á mismunandi árstímum. Myndina er hægt að bera saman við mynd 7 á blaðsíðu 10 sem sýnir brúuð hitagögn úr leiðöngrum frá sömu árstímum. Árstíðasveifla í sjávarhita er ekki mikil í staðalkeyrslunni. Gildin við suðurströndina eru á milli 6°C og 7°C á öllum árstímum nema yfir sumartímann þegar hann fer yfir 7°C . Fyrir norðan landið er meiri breytileiki sem gefur til kynna að árstíðabundinn breytileiki í Irmingerstraumnum sé til staðar í líkaninu. Sjávarhiti breytist lítið við norðurströndina milli febrúar-mars og maí-júní en fyrir norðan Vestfirði sést munur í sjávarhita sem bendir til aukins innstreymis. Yfir sumartímann er sjávarhiti fyrir norðan landið í hámarki á milli 3°C og 5°C . Á myndum á blaðsíðu 10, sem sýna meðalhita við suðurströndina, sést mun meiri breytileiki milli árstíða. Fyrir sunnan land fer sjávarhiti yfir 9°C á sumrin og yfir 5°C fyrir norðan land. Yfir vetrartímann fara gildin niður í 2°C og 3°C fyrir norðan land og 6°C og 7°C fyrir sunnan land.

Skilin á Grænlandssundi koma vel fram í líkaninu og ber vel saman við það sem má sjá á myndunum á blaðsíðu 10. Staðsetning skilanna norðaustur af landinu, þar sem áhrifa frá Austur-Íslandsstraumnum gætir, er svipuð allan ársins hring. Gildi undir 0°C sjást á öllum myndunum. Á myndunum sem sýna meðalhita úr leiðöngrum sjást svona lág gildi ekki nema á veturna og á vorin. Breytileiki milli árstíða í Austur-Íslandsstraumnum kemur því ekki fram í staðalkeyrslunni.

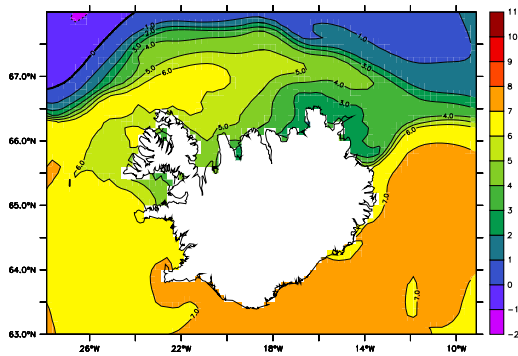
Mynd 15 á blaðsíðu 23 sýnir seltu í staðalkeyrslunni á miðunum við Ísland. Myndin sýnir seltu á 0-50 m dýpi á mismunandi árstímum. Myndina er hægt að bera saman við mynd 8 á blaðsíðu 11 sem sýnir brúuð seltugögn úr leiðöngrum frá sömu árstímum. Það kemur fram minni breytileiki í seltu milli árstíða í líkaninu en í brúunargildum. Í staðalkeyrslunni er selta undir 34 viðvarandi á skilunum í Grænlandssundi (myndir 15(a)-15(d)). Í brúuðu gögnunum koma svo lág gildi ekki fram fyrr en að vori og sumri. Við suður- og vesturströndina eru seltugildi alltaf yfir 35 í staðalkeyrslunni. Í brúuðu gildunum eru þau um 0.2 einingum lægri og á haustin fer seltan niður fyrir 34.8 við suðurströndina.



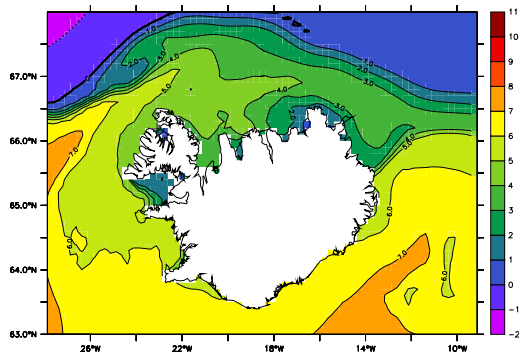
(a) Meðaltal febrúar-mars



(b) Meðaltal maí-júní

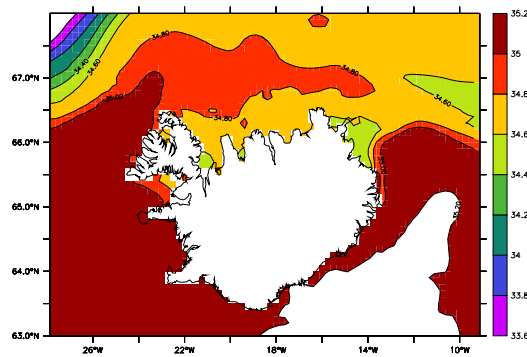


(c) Meðaltal ágúst-september

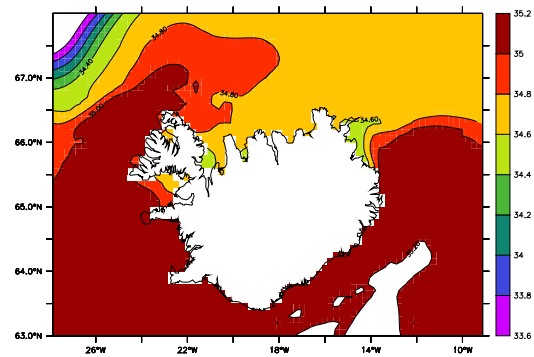


(d) Meðaltal október-nóvember

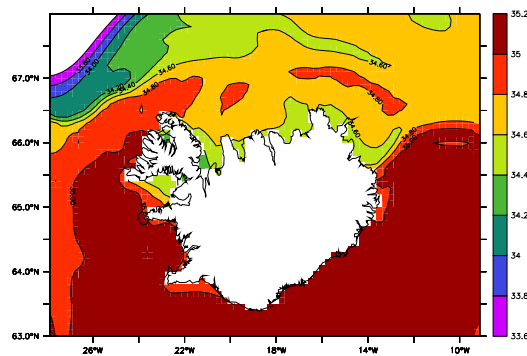
Mynd 14: Hiti á 0-50 m dýpi á mismunandi árstímum eins og hann kemur fram í staðalkeyrslunni.



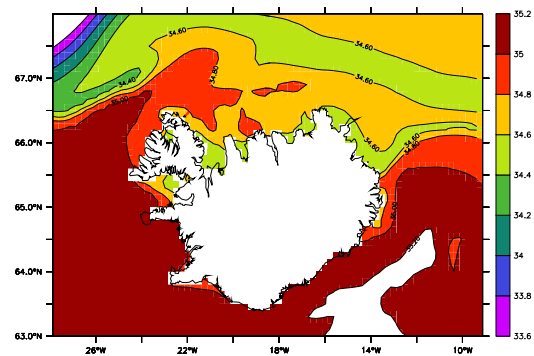
(a) Meðaltal febrúar-mars



(b) Meðaltal maí-júní



(c) Meðaltal ágúst-september



(d) Meðaltal október-nóvember

Mynd 15: Selta á 0-50 m dýpi á mismunandi árstímum eins og hann kemur fram í staðalkeyrslunni. Skallinn er sá sami og á mynd 8 til að auðvelda samanburð en hér eru gildin ekki alltaf innan skalans.

4 Áhrif afrennslis á strandstrauma

Úrkoma sem fellur á landi skilar sér til sjávar með grunnvatni og ám. Eðlisléttari sjór við ströndina veldur straumi henni samsíða. Til að kanna hvaða áhrif rennsli af Íslandi hefur á strauma við ströndina var líkanið keyrt með og án afrennslis og munur á straumsviði skoðaður. Vatnamælingar Orkustofnunar safna gögnum um rennsli ferskvatns til sjávar. Mynd 16 sýnir afrennsli af öllu landinu þar sem því er skipt niður eftir landshlutum (Kristinn Einarsson, 2004). Afrennslið er nokkuð jafnt yfir vetrarmánuðina en eykst á vorin og er í hámarki yfir sumartímann þegar leysing jökla er í hámarki.

Tilvist nokkuð samfellds strandstraums hefur verið studd með þeirri ályktun að flæði sjávar við Ísland sé í grófum dráttum í jarðsvigsjafnvægi (*e. geostrophic balance*). Það þýðir að flæðinu sé hægt að lýsa með jafnvægi svigkrafts jarðar (*e. Coriolis force*) og þrýstikrafts (þrýstifallandakrafts). Strandstraumurinn umhverfis Ísland er sýndur með gulum lit á mynd 4. Styrkur straumsins hefur verið áætlaður sunnan Reykjaness (Jón Ólafsson, 1985) en styrkur hans umhverfis landið og samfeldni eru ekki ljós. Vindar hafa áhrif á dreifingu afrennslisins (Unnsteinn Stefánsson og Guðmundur Guðmundsson, 1978) og um leið á hversu samfelldur straumurinn verður.

4.1 Fræði

Grunnvatnsjöfnurnar (*e. shallow water equations*) lýsa flæði vökva á kvarða þar sem láréttar vegalengdir eru mun meiri en lóðréttar.

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (11)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (12)$$

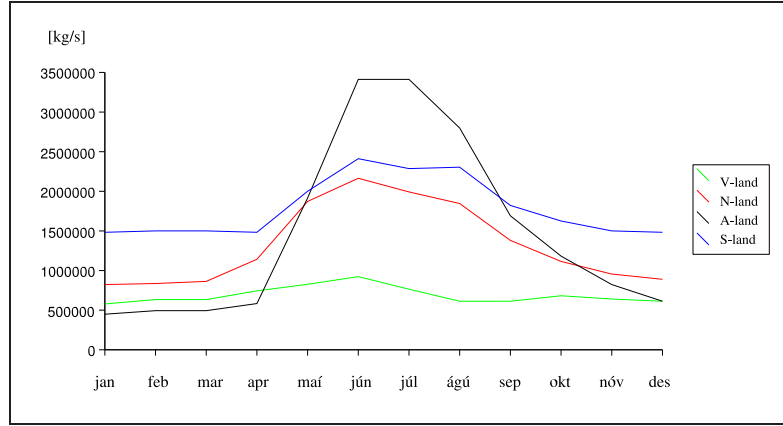
$$\rho g = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (13)$$

Jöfnurnar eru línuleg framsetning á hreyfijöfnunni (jafna 2) eftir að nokkrar einfaldanir hafa verið gerðar á henni. Ef flæðið er án hröðunar er jafnvægi milli svigkrafts og þrýstifallanda í lárétta stefnu.

$$-fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (14)$$

$$fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} \quad (15)$$

Með því að leysa saman jöfnur 13, 14 og 15 er hægt að leiða út jöfnur fyrir hraða sem fall af eðlismassadreifingu.



Mynd 16: Rennsli af Íslandi skipt niður á landshluta. Blár litur: Suðurland. Svartur: Austurland. Rauður: Norðurland. Grænn: Vesturland. Tölurnar eru frá Orkustofnun og miðast við að heildarrennsli af öllu landinu sé 5300.000 kg/s (5300 m³/s). (Kristinn Einarsson, 2004)

$$\frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{g}{f\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} \quad (16)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{g}{f\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} \quad (17)$$

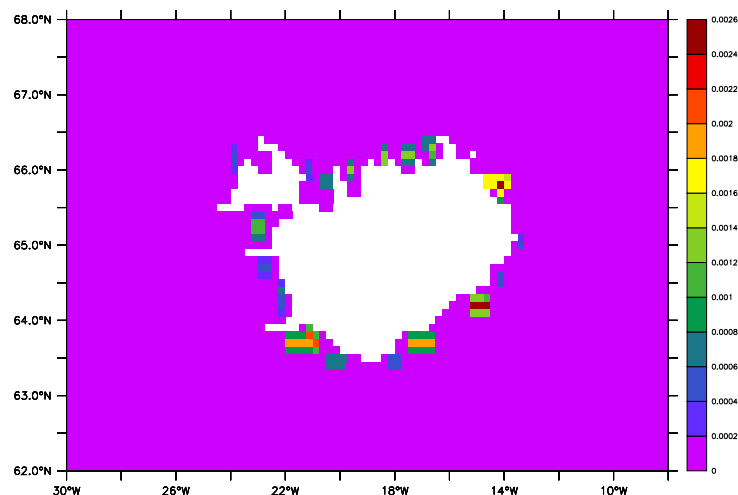
Ef eðlismassadreifingin er þekkt er hægt að reikna hvernig láréttur hraði breytist með dýpi í ákveðinni fjarlægð frá landi.

4.2 Uppsetning tilraunar

Þau gögn sem notuð eru um rennsli ferskvatns af landinu koma frá Vatnamælingum Orkustofnunar. Um er að ræða mat á afrennsli dreifðu á landshluta og mánuði. Það er byggt á afrennslismati Hauks Tómassonar frá árinu 1981. Mat-ið byggir á því að heildarrennsli af landinu (með grunnvatnsstraumi) sé 5300 m³/s. Landshlutarnir eru skilgreindir með eftirfarandi hætti. Vesturland: Frá Straumsvík að Hrútafjarðarhálsi. Norðurland: Frá Hrútafjarðarhálsi að Langanesi. Austurland: Frá Langanesi að Öræfajökli. Suðurland: Frá Öræfajökli að Straumsvík. (Kristinn Einarsson, 2004)

Mynd 16 sýnir afrennslið eftir landshlutum. Rennslið er breytilegt eftir árstíðum og er í hámarki á sumrin. Langstærsta sveiflan er í rennsli af Austurlandi en að meðaltali er rennslið mest af Suðurlandi.

Afrennslið (*e. runoff*) er tekið inn í líkanið í einingunum kg s⁻¹m⁻² (rennsli á flatarmálseiningu). Þar sem afrennslið kemur inn í líkanið (sjá mynd 17) blandast það yfirborðslaginu. Það fær sama hitastig og sjórinn í yfirborðslaginu og seltuna núll (Griffies o.fl., 2004). Rennsli fyrir hvern landshluta var skipt niður á reiti og í hverjum reit er meðalrennsli á flatarmálseiningu fundið. Reitirnir eru misstórir og

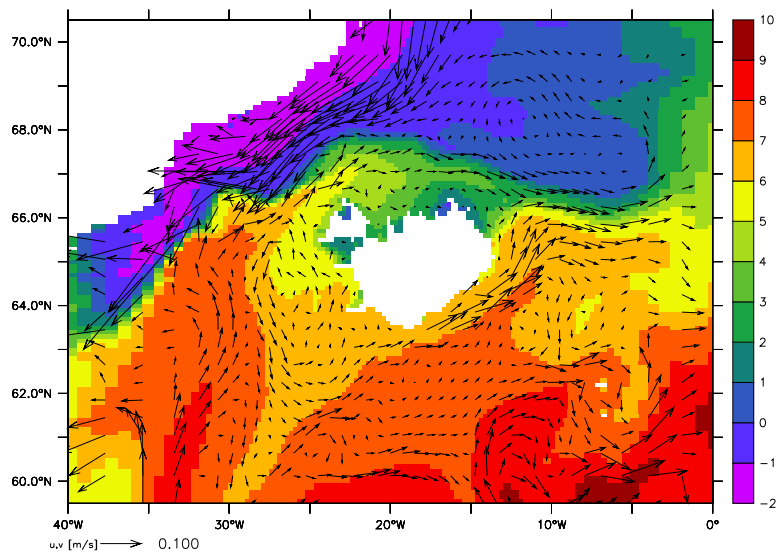


Mynd 17: Meðalársrennsli ($\text{kg s}^{-1}\text{m}^{-2}$) af Íslandi. Tölurnar eru byggðar á gögnum frá Orkustofnun sem koma fram á mynd 16.

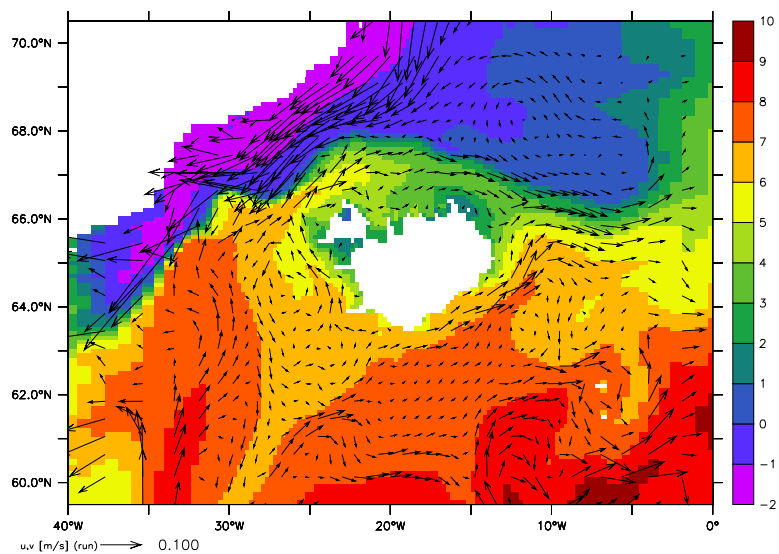
misdreifðir og tekið var tillit til staðsetningar stærstu jökulánna þegar staðsetning þeirra var ákveðin.⁷ Mynd 17 sýnir hvernig meðalársafrennsli sem notað er í tilrauninni dreifist kringum landið. Til að árstíðasveifla kæmi fram var notað meðalrennsli á mánuði fyrir hvern landshluta.

Staðalkeyrslan, sem fjallað var um í kafla 3, byggist á meðaltalsgögnum sem lýsa veðurfari í meðalári. Niðurstöður hennar eiga að sýna strauma og meðalástand hafsins í meðalári. Gögnin sem notuð eru fyrir afrennsli eru samskonar meðaltalsgögn. Til að skoða áhrif afrennslis á meðalástand var sett upp keyrsla sem var í öllum atriðum eins og staðalkeyrslan en afrennsli var bætt við. Líkanið var síðan keyrt í 10 líkanár eins og staðalkeyrslan og þannig er hægt að nota staðalkeyrsluna til viðmiðunar. Í hverju tímaskrefi reiknar líkanið hita, seltu, eðlismassa, straum og fleiri eðlisþætti. Fyrir hvern mánuð eru svo meðaltöl þessarra eðlisþátta reiknuð og skrifuð í skrár.

⁷Fyrir Suðurland: Ölfusá og Þjórsá. Vesturland: Hvíta og Norðurá. Norðurland: Jökulsá á fjöllum. Austurland: Jökulsá á Dal og Lagarfljót.

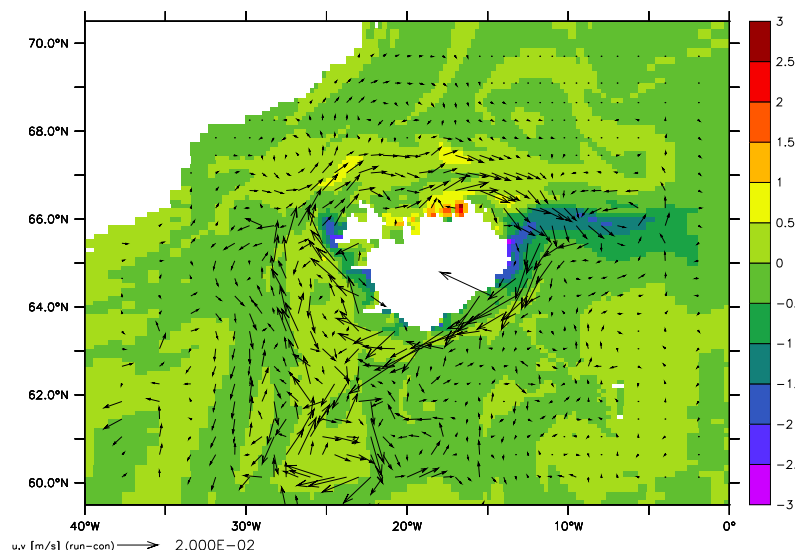


(a) Án afrennslis



(b) Með afrennslis

Mynd 18: Ársmeðaltal straums (m/s) og hita (°C) á 0-50 m dýpi í staðalkeyrslu með og án afrennslis. Örvarnar undir myndunum tákna vigra sem hafa stærðina 10 cm/s.



Mynd 19: Mismunur meðalstraums (m/s) og meðalhita ($^{\circ}\text{C}$) á 0-50 m dýpi. Hita- og straumsvið viðmiðunarkeyrslu er dregið frá hita- og straumsviði afrennslikeyrslu, sjá mynd 18. Örin undir myndinni táknar vigur sem hefur stærðina 2 cm/s.

4.3 Niðurstöður

Mynd 18 sýnir hita og straum í staðalkeyrslu með afrennsli (afrennslikeyrsla) og í staðalkeyrslu án afrennsli (viðmiðunarkeyrsla). Meðlafrennsli sést á mynd 17. Myndirnar sýna ársmeðaltal meðalstraums og meðalhita á 0 m til 50 m dýpi. Í báðum tilvikum hefur líkanið verið keyrt í 10 líkanár.

Við fyrstu sýn er ekki mikill munur á sviðunum. Á myndinni sem sýnir flæði með afrennsli (mynd 18(b)) má greina að hlýja tungan fyrir norðan Vestfirði teygir sig lítið eitt lengra til austurs og að sjávarhiti fyrir norðaustan landið (út af Langanesi) er hærri í afrennslikeyrslunni. Fyrir utan Faxaflóa og Breiðafjörð sést greinileg aukning á straumi í afrennslikeyrslu miðað við viðmiðunarkeyrslu og sjávarhiti fyrir vestan landið er meiri í afrennslikeyrslunni. Í viðmiðunarkeyrslu er straumurinn til norðausturs, meðfram suðausturströndinni, meiri (mynd 18(a)) en í afrennslikeyrslu (mynd 18(b)) og hitaskilin fyrir austan landið eru norðar í viðmiðunarkeyrslunni.

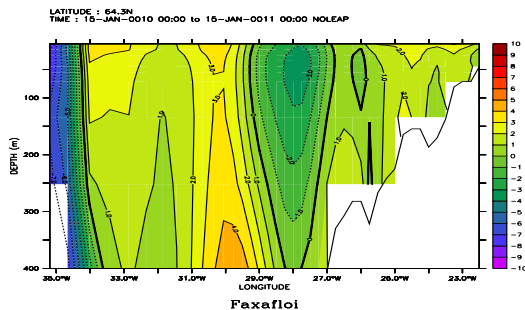
Til að sjá hvaða áhrif afrennslið hefur er mismunur hita og straums í keyrslunum sýndur á mynd 19. Straumur og hiti í viðmiðunarkeyrslunni hafa verið dregin frá straumi og hita í afrennslikeyrslunni. Á þeim stöðum sem afrennslið er tekið inn í líkanið fær það sama hitastig og sjórinn í yfirborði. Breytingar á

sjávarhita eru því vegna áhrifa ferskvatns á strauma í líkaninu. Afrennslið veldur straumi réttisælis í kringum landið. Vestan við landið kemur fram straumur á tveimur mismunandi stöðum: Fyrir ofan landgrunnsbrún (á um það bil 27°W) og nær landi (á um það bil 23°W). Fyrir norðan Vestfirði og austur með norðurströndinni er straumurinn jafnari og nær frá ströndinni allt norður að $67^{\circ}30'\text{N}$. Áhrif á sjávarhita sjást hringinn í kringum landið en þau eru mest við norðurströndina og fyrir austan landið. Við norðurströndina veldur aukið innstreymi hlýsjávar og aukinn straumur til austurs yfir landgrunnið hlýnun sem er á bilinu $0.5\text{--}2.5^{\circ}\text{C}$. Fyrir austan landið veldur straumurinn kólnun upp á $1.5\text{--}2.5^{\circ}\text{C}$. Skýringin á þessu er að straumur vegna afrennslis minnkar heildar strauminn til austurs við suðausturströndina og við það færast skilin sunnar.

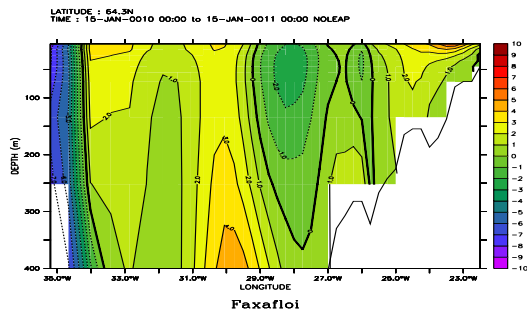
Fyrir vestan land er greinileg staumaukning við ströndina en einnig yfir landgrunnsbrúninni. Straumur í norður-suðurstefnu á Faxaflóasniði er sýndur á mynd 20. Straumur með neikvætt formerki þýðir að stefnan er til suðurs. Það er straumur til suðurs yfir landgrunnsbrúninni í báðum keyrslum. Þessi straumur var ræddur í kafla 3 en hvorki mælingar né reynsla styðja tilvist hans. Í afrennsliskeyrslunni (mynd 20(b)) er hann sýnilega minni en í viðmiðunarkeyrslunni (mynd 20(a)). Mismunur straumsviðsins í keyrslunum er einnig sýndur á myndinni (mynd 20(c)) og þar sést að afrennslið veldur straumi til norðurs yfir landgrunnsbrúninni sem minnkar þar af leiðandi heildarstrauminn til suðurs. Í afrennsliskeyrslunni er straumur til norðurs við ströndina, á milli 24°W og 23°W . Þessi straumur er til staðar í viðmiðunarkeyrslunni en þar er hann mun veikari. Afrennslið eykur styrk þessa strandstraums og í afrennsliskeyrslunni er straumhraðinn greinilega háður dýpi.

Fyrir norðan landið virðist straumurinn sem afrennslið veldur vera frekar jafn á belti sem nær frá ströndinni að $67^{\circ}30'\text{N}$. Mynd 21 sýnir straum í austur-vestur stefnu á sniði við Hornbanka. Kjarninn í innflæði Atlantssjávarins er á milli 67°N og $67^{\circ}30'\text{N}$ í báðum keyrslum. Straumur með jákvæð formerki er til austurs. Afrennslið veldur auknum straumstyrk í kjarnanum (mynd 21(c)). Við ströndina er einnig veikur straumur til austurs og afrennslið eykur styrk hans.

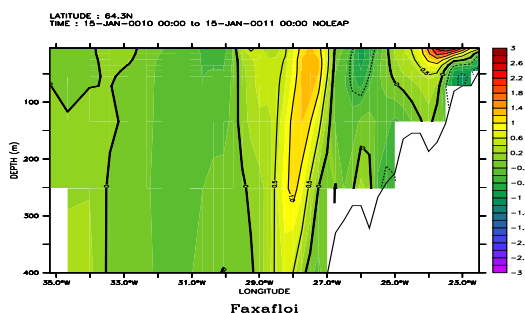
Vegna þess hversu mikil árstíðasveifla er í rennsli ferskvatns af Íslandi er rétt að skoða áhrif þess með tíma. Á mynd 20(d) er straumur á tveim stöðum á Faxaflóasniði sýndur, í punktinum 23.5°W (þar sem straumurinn næst landi kemur fram) og í punktinum 27.5°W (þar sem straumurinn yfir landgrunnsbrúninni kemur fram). Næst landi er meðaltal straumsins á 0-25 m fundið: Svarta línan sýnir straum í viðmiðunarkeyrslunni og sú rauða straum í afrennsliskeyrslunni. Utar er meðaltal straumsins á 0-50 m fundið: Svarta línan með punktunum sýnir straum í viðmiðunarkeyrslu og sú rauða með punktunum straum í afrennsliskeyrslu. Nær landi (23.5°W) er engin greinileg árstíðasveifla. Afrennslið eykur styrk straumsins sem nemur 2-3 cm/s yfir allt árið. Utar, yfir landgrunnsbrúninni (27.5°W), minnkar afrennslið straum til suðurs (neikvætt formerki). Þar er samt ekki um jafna aukningu á straumi að ræða eins og sést nær landi. Veikur straumur til suðurs á 28°W (mynd 20(c)) gæti bent til þess að straumur til suðurs minnki ekki heldur færist lengra inn á landgrunnið.



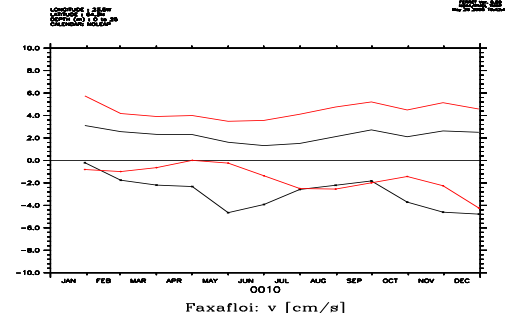
(a) Staðalkeyrsla án afrennslis



(b) Staðalkeyrsla með afrennsli

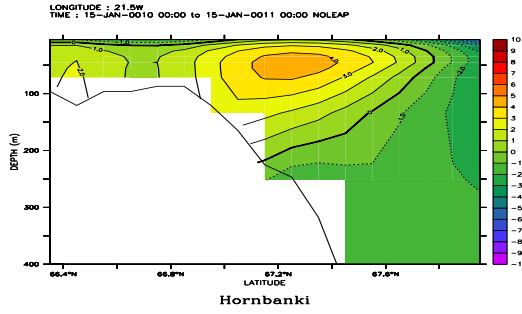


(c) Mismunur á (b) og (a)

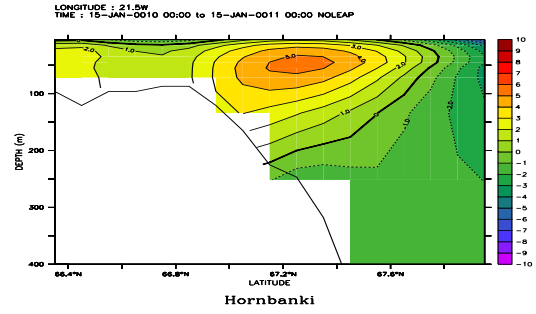


(d) 23.5°W (efri) og 27.5°W (neðri)

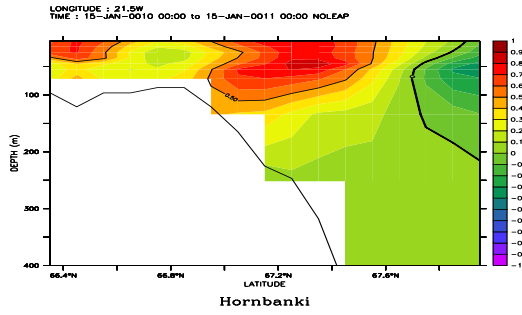
Mynd 20: Straumur (cm/s) í norður-suðurstefnu á Faxaflóasniði í staðalkeyrslu með og án afrennslis. Staðsetning sniðsins sést á mynd 10. (a) Án afrennslis. (b) Með afrennsli. (c) Mismunur á straumi í staðalkeyrslu með og án afrennslis (straumur án afrennslis dreginn frá straumi með afrennsli). (d) Straumur á tveim stöðum á sniðinu: Svartur litur: Án afrennslis. Rauður: Með afrennsli. Lína án punkta: 0-25 m dýpi á 23.5°W. Lína með punktum: 0-50 m dýpi á 27.5°W.



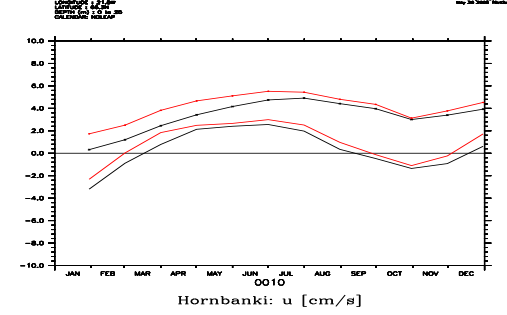
(a) Staðalkeyrsla án afrennslis



(b) Staðalkeyrsla með afrennslis



(c) Mismunur á (b) og (a)



(d) 66.4°N (neðri) og 67.3°N (efri)

Mynd 21: Straumur (cm/s) í austur-vesturstefnu á sniði við Hornbanka í staðalkeyrslu með og án afrennslis. Staðsetning sniðsins sést á mynd 10. (a) Án afrennslis. (b) Með afrennslis. (c) Mismunur á straumi í staðalkeyrslu með og án afrennslis (straumur án afrennslis dreginn frá straumi með afrennslis). (d) Straumur á tveim stöðum á sniðinu: Svartur litur: Án afrennslis. Rauður: Með afrennslis. Lína án punkta: 0-25 m dýpi á 66.4°N. Lína með punktum: 0-50 m dýpi á 67.3°N.

Mynd 21(d) sýnir straum á tveim stöðum á Hornbankasniði. Í punktinum 66.4°N þar sem straumurinn næst landi kemur fram og í punktinum 66.3°N sem er í miðjum kjarna innstreymisins. Næst landi er meðaltal straumsins á 0-25 m fundið: Svarta línan sýnir straum í viðmiðunarkeyrslunni og sú rauða straum í afrennsliskeyrslunni. Utar er meðaltal straumsins á 0-50 m fundið: Svarta línan með punktinum á sýnir straum í viðmiðunarkeyrslu og sú rauða með punktinum á straum í afrennsliskeyrslu. Straumurinn er meiri fjær landi. Greinileg árstíðasveifla sést á báðum stöðum. Straumurinn eykst í mars-maí og er í hámarki í júní-júlí næst landi og mánuði seinna þar sem innstreymið er mest. Afrennslið eykur styrk straumsins en ekki eins mikið og á Faxaflóa.

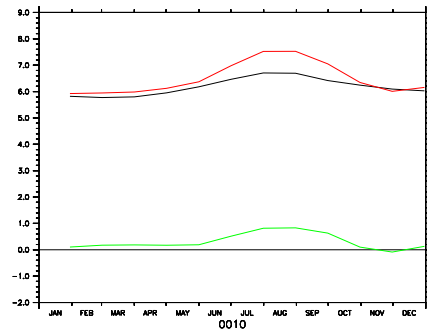
Sjávarhiti á þessum fjórum stöðum er sýndur á myndum 22 og 23. Á Faxaflóa (mynd 22 (a)) er árstíðasveifla í hita sem nær hámarki í ágúst í báðum keyrslum. Í afrennsliskeyrslu er hámarkshiti meiri en í viðmiðunarkeyrslu en hámarkið er á sama tíma í báðum keyrslum. Við Hornbanka er árstíðasveiflan svipuð á báðum stöðum (mynd 23). Í staðalkeyrslu með afrennsli hækkar hitinn fyrr á vorin. Við landið (mynd 23 (a)) lækkar hann einnig fyrr á haustin en fjær landi (mynd 23 (b)) er sjávarhiti meiri fyrrihluta hausts en síðan lægri eins og sést á grænu línunni á myndinni.

Mynd 24 á blaðsíðu 35 sýnir mismun á hita og straumi í keyrslum með og án afrennslis á mismunandi árstímum. Sjávarhiti við norðurströndina er alltaf hærri í afrennsliskeyrslunni en í viðmiðunarkeyrslunni. Þar er mismunurinn mestur á veturna og á vorin. Austur af landinu er sjávarhiti alltaf lægri í afrennsliskeyrslunni. Þar er mismunurinn minnstur á haustin. Athygli vekur breytileiki í mismun á straumsviði milli árstíða þar sem enginn breytileiki fannst í mismuninum á Faxaflóa og á Hornbanka.

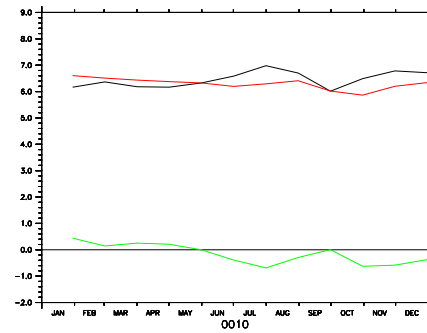
4.4 Umræða

Sjávarhiti á Faxaflóa er í hámarki á sumrin sjá mynd 22(a). Þegar líkanið er þvingað með afrennsli magnast árstíðasveiflan og sumarhámarkið hækkar en færist ekki til í tíma. Afrennslið blandast yfirborðslaginu og þar sem það hefur seltuna núll lækkar eðlismassi í laginu. Lægri eðlismassi hefur þau áhrif að yfirborðslagið verður stöðugra og þá getur orðið meiri sumarupphitun.

Sjávarhiti á Hornbanka byrjar að hækka um mánaðarmótin mars-apríl ef afrennsli er ekki til staðar í líkaninu, sjá mynd 23, en um hálfum mánuði fyrr ef flæðið er þvingað með afrennsli. Straumaukningin vegna afrennslisins á Hornbanka er svo til jöfn yfir allt árið, sjá mynd 21(d). Innflæði Atlantsjávar er í hámarki á sumrin. Punkturinn 67.3°N er í kjarna innstreymisins. Þar er sjávarhiti hærri í keyrslu með afrennsli en í keyrslu án afrennslis á sumrin og fram á haust. Jöfn aukning á straumstyrk veldur því að innflæðið er fyrr í ákveðnu gildi miðað við viðmiðunarsvið á vorin en seinna á haustin. Það getur útskýrt af hverju sjávarhiti er hærri á vorin og fyrrihluta hausts. Nær landi, í punktinum 66.4°N, lækkar sjávarhiti fyrr á haustin í keyrslu með afrennsli. Fyrir sunnan land er mikil hækking á sjávarhita í efstu lögum á sumrin. Ef gert er ráð fyrir að

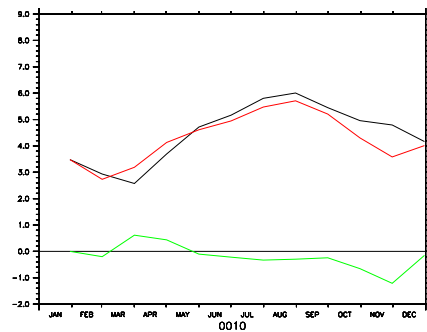


(a) 23.5°W

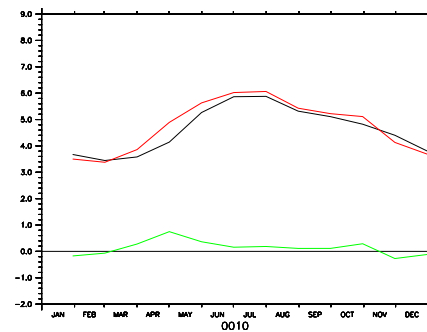


(b) 27.5°W

Mynd 22: Árstíðasveifla sjávarhita á Faxaflóasniði. Til vinstri: sjávarhiti (°C) á 0-25 m dýpi á 23.5°W. Til hægri: sjávarhiti (°C) á 0-50 m dýpi á 27.5°W. Svartur litur: Án afrennslis. Rauður: Með afrennslis. Grænn: Mismunur á sjávarhita með og án afrennslis.



(a) 66.4°N



(b) 67.3°N

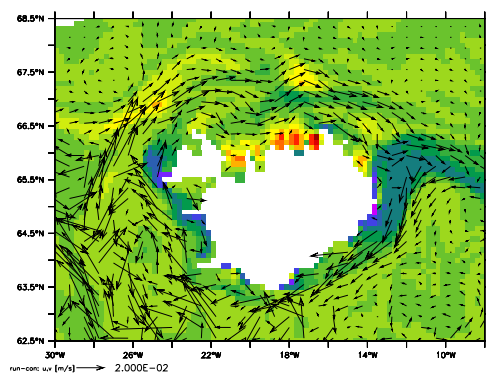
Mynd 23: Árstíðasveifla sjávarhita á Hornbankasniði. Til vinstri: sjávarhiti (°C) á 0-25 m dýpi á 66.4°W. Til hægri: sjávarhiti (°C) á 0-50 m dýpi á 67.3°W. Svartur litur: Án afrennslis. Rauður: Með afrennslis. Grænn: Mismunur á sjávarhita með og án afrennslis.

strandstraumar beri þessa hækkun að einhverju leyti norður fyrir landið gæti það útskýrt álíka hliðrun á hitaferlinum og sést á mynd 23(a). Á Faxaflóa er sumarhitun þó ekki byrjuð þegar sjávarhiti byrjar að hækka á Hornbanka og þessi skýring er þar af leiðandi ekki mjög sennileg.

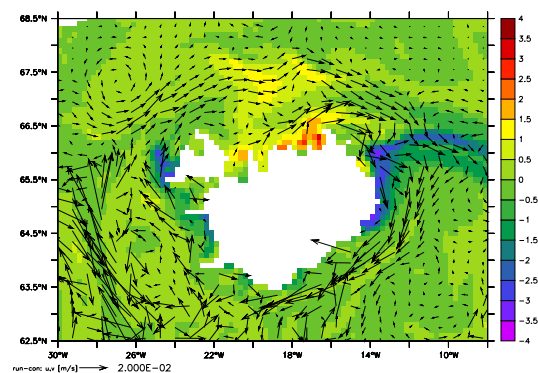
Í líkaninu er efstu 50 metrunum skipt í 5 jöfn dýptarbil. Hvert dýptarbil hefur ákveðna eðliseiginleika. Yfirborslagið samanstendur af efsta laginu sem hefur þykktina 10 m og η sem er hæð sjávar miðað við jafnmættisflöt. Yfirborslagið er eina lagið sem hefur breytilega þykkt þar sem η getur breyst með tíma. Önnur lög í líkaninu hafa fasta þykkt. Árstíðabreytileiki kemur fram í breytingum á eðlismassa í lögnum og blöndun milli laga. Á sumrin má gera ráð fyrir að upphitun sé meiri í yfirborðslaginu og það verði stöðugra. Einnig eru vindar ekki eins sterkir á sumrin svo lóðrétt blöndun er þá í lágmarki. Afrennsli er bætt inn í yfirborðslagið. Á sumrin, þegar yfirborðslagið er sem stöðugast, getur afrennli borist lengra frá ströndinni. Það blandst þá yfir stærra svæði og straumar sem það veldur verða ekki eins samfelldir. Það getur verið ástæða þess að engin árstíðasveifla fannst í straumaukningu á Faxaflóa og við Hornbanka.

Afrennslið veldur því að yfirborðslagið verður stöðugra. Straumaukning yfir landgrunnsbrún á Faxaflóasniði og á breiðu belti fyrir norðan land bendir til þess að afrennslið berist í yfirborðslaginu töluvert frá landi og blandist ekki lóðrétt við ströndina. Mælingar á hita og seltu sunnan Reykjaness benda til þess að strandstraumurinn sé á afmörkuðu svæði við ströndina (Jón Ólafsson, 1985). Til að auka blöndun við ströndina er hægt að að blanda afrennslinu inn í fleiri dýptarbil. Í stað efsta lagsins er hægt að blanda því inn í 3-4 efstu lögin. Aðferð til að gera þetta er lýst í handbók um MOM4 eftir Griffies o.fl. (2004).

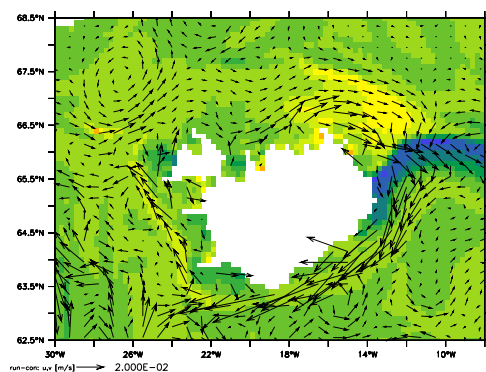
Á mynd 24 sést að mismunur á straumi og hita í keyrslunum er breytilegur eftir árstímum. Á myndum sem sýna sjávarhita á Faxaflóa og við Hornbanka sést að mismunur sjávarhita er breytilegur eftir árstímum og þarf það ekki að benda til árstíðabundinnar straumaukningar heldur getur verið um jafna aukningu að ræða. Breytileiki í straumsviði er í ósamræmi við þá jöfnu straumaukningu sem sést á Faxaflóa og við Hornbanka. Breytileiki í útbreiðslu afrennslisins og áhrif vinda þar á hafa þarna einhver áhrif.



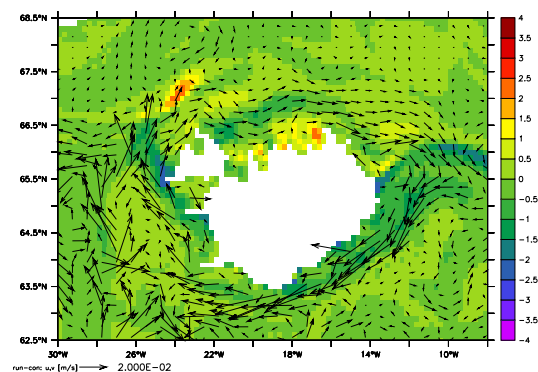
(a) febrúar-mars



(b) maí-júní



(c) ágúst-september



(d) október-nóvember

Mynd 24: Straumur (m/s) og hiti ($^{\circ}\text{C}$) á 0-50 m dýpi í staðalkeyrslu með afrennslis á mismunandi árstímum. Straumur og hiti í staðalkeyrslu án afrennslis hefur verið dregin frá. Örvarnar undir myndunum tákna vigra sem hafa stærðina 2 cm/s.

5 Áhrif hvassviðrakafla

Sem lið í að skoða áhrif mismunandi tímaupplausnar vindasviðs á yfirborðsstrauma voru áhrif hvassviðrakafla skoðuð sérstaklega. Markmiðið var að skoða hvort veður sem ganga yfir á skömmum tíma og koma að takmörkuðu leyti fram í meðaltali gætu hugsanlega haft áhrif á strauða til lengri tíma litið. Til að gera þetta voru settar upp tilraunir þar sem flæðið var þvingað í nokkra daga með sterkum og stöðugum vindi. Vindasviðið var skilgreint til að líkja eftir aðstæðum sem þurfa að vera til að forsendur lausna Ekmans á hreyfijöfnunum séu uppfylltar. Þetta eru *kjöraðstæður* sem eru valdar til að skoða áhrif mismunandi vindáttar á flæðið. Til að líkja eftir *raunaðstæðum* var gerð önnur tilraun þar sem vindasvið var skilgreint út frá suðvestan hvassviðri sem gekk yfir landið um miðjan janúar 1995.

5.1 Fræði

Eins og fjallað var um í kafla 4 lýsa jöfnur 11 og 12 hreyfingu vökva í lárétta stefnu á kvarða þar sem láréttar vegalengdir eru mun meiri en lóðréttar. Hægt er að skrifa jöfnurnar ásamt krafti sem vindþvingun veldur.

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + f \mathbf{k} \times \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \tau}{\partial z}$$

Þar sem $\mathbf{u} = (u, v)$ er hraði í lárétta stefnu,

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \tau}{\partial z}$$

er núningskrafturinn sem verkar á rúmmálseiningu vökva og $\tau = (\tau_x, \tau_y)$ er núningsspenna. Jafnan er línuleg svo hægt er að skrifa $\mathbf{u}_h = \mathbf{u}_g + \mathbf{u}_e$ og skipta jöfnunni í tvo hluta,

$$\frac{\partial \mathbf{u}_g}{\partial t} + f \mathbf{k} \times \mathbf{u}_g = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p \quad (18)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_e}{\partial t} + f \mathbf{k} \times \mathbf{u}_e = \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (19)$$

þann sem er knúinn af þrýstingsbreytingum (*e. geostrophic part*) og þann sem er vindknúinn (*e. Ekman part*). Til að skoða áhrif vindþvingunar á flæðið er hægt að líta á lausnir Ekmans á jöfnu 19. Lausnirnar fást með því að gera ráð fyrir að flæðið sé stöðugt, að núnungur við botn sé hverfandi og að vindur blási viðvarandi í sömu átt (Pond og Pickard, 1983).

$$\mathbf{u}_e = V_0 \exp \left\{ \frac{\pi}{D_e} z \right\} \left[\pm \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{D_e} z \right) \mathbf{i} + \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{D_e} z \right) \mathbf{j} \right] \quad (20)$$

Lausnin er fengin með því að leggja y-ás í vindstefnu og gera ráð fyrir að vindstyrkur breytist ekki með tíma. Styrkur straumsins er

$$V_0 \exp \left\{ \frac{\pi}{D_e} z \right\}$$

þar sem $V_0 = (\sqrt{2}\pi\tau_s)/(D_e\rho|f|)$ er straumstyrkur í yfirborði og D_e er Ekman-dýpi. Styrkurinn minnkar með dýpi og þegar $z = -D_e$ hefur straumstyrkurinn fallið um $\exp(\pi)$ miðað við straumstyrk í yfirborði. Þar er jafnan gert ráð fyrir að áhrif vindsins séu hverfandi. Stefna straumsins breytist einnig með dýpi. Hún er

$$\pm \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{D_e} z \right) \mathbf{i} + \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{D_e} z \right) \mathbf{j}$$

þar sem x-liðurinn hefur jákvætt formerki á norðurhveli jarðar en neikvætt á suðurhveli. Í yfirborði myndar straumvigur 45° horn við vindvigur á norðurhveli jarðar. Með dýpi stækkar hornið milli vigranna til hægri og á Ekman-dýpinu er straumstefnan 180° miðað við straumstefnu í yfirborði. Á suðurhveli snýst þetta við og straumvigur myndar 45° horn til vinstri við vindvigur og hornið stækkar til vinstri.

Þar sem straumurinn breytist með dýpi höfum við áhuga á hvaða áhrif krafturinn hefur á heildarflæðið. Til að finna flæði vegna vindþvingunar heildum við jöfnu 19 yfir Ekman-lagið og fáum

$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{U}_e + f \mathbf{k} \times \mathbf{U}_e = \frac{1}{\rho_0} \tau_s \quad (21)$$

þar sem,

$$\mathbf{U}_e = \int_{-D_E}^0 \mathbf{u}_e dz$$

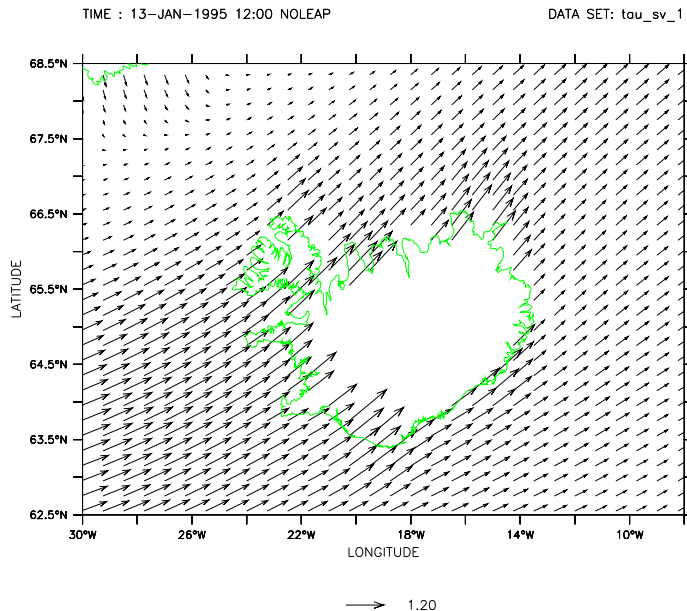
er Ekman-flæði sem er flæðið vegna vindþvingunarinnar. Athugum að á dýpinu D_e gerum við ráð fyrir að áhrifa vindsins gæti ekki lengur. Við stöðugt ástand þá er massaflæðið

$$\mathbf{M}_e = \rho_0 \mathbf{U}_e = -\frac{1}{f} \mathbf{k} \times \tau_s \quad (22)$$

Massaflæðið er hornrétt á stefnu vindsins, 90° til hægri á norðurhveli og 90° til vinstri á suðurhveli.

Þegar vindur hefur blásið viðvarandi í sömu átt í nokkurn tíma og lausnir Ekmans eru uppfylltar eru áhrifin við ströndina þau að straumar liggja ýmist að ströndinni eða frá henni eftir því hver stefna vindsins er miðað við ströndina. Þetta veldur hækkun eða lækkun yfirborðs sjávar og því fylgir þrýstingur frá eða að ströndu en vegna áhrifa frá jarðsvigskrafti fæst straumur þvert á þrýstingsstefnuna. Lítum á jöfnu 18 og gerum ráð fyrir að flæðið sé stöðugt.

$$f \mathbf{k} \times \mathbf{u}_g = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p$$



Mynd 25: Vindspenna við Ísland 13. janúar 1995. Vindasvið hefur sömu stefnu og vindspenna en önnur gildi. Örin undir myndinni tákna vigur sem hefur stærðina 1.2 N/m^2 .

Hægt er að skrifa $p = p_0 + \rho_0 g \eta$, þar sem p_0 er þrýstingur við yfirborð við jafnvægi (þegar engin hreyfing er á yfirborðsfletinum) og η er hæð yfirborðsins miðað við jafnvægisflöt. Jafnan verður

$$\mathbf{u}_g = \frac{g}{f} \mathbf{k} \times \nabla \eta \quad (23)$$

Breyting á hæð sjávar við ströndina veldur því straumi sem er samsíða henni.

5.2 Uppsetning tilraunar

Til að líkja eftir skilyrðum þar sem forsendur fyrir lausnum Ekmans gilda voru settar upp tilraunir þar sem stöðugur vindur úr mismunandi átt þvingaði flæðið.⁸ Áttirnar voru: N-, NA-, A-, SA-, S-, SV-, V-, og NV-átt. Í hverjum punkti á reikninetinu var stærð vindspennunnar gefið gildið 1 N/m^2 . Ef við berum það saman við mynd 32(a) í kafla 6, sem sýnir stærð vindspennu á stöð 6 á Látrabjargssniði árið 1995, sjáum við að þetta er mikil þvingun en ekki óraunhæf. Mesti styrkur vindspennunnar á þessum stað er um 2 N/m^2 .

Keyrslurnar átta voru settar upp á sama hátt. Líkanið var keyrt með daglegum gildum vindspennu og hita frá 1995 uns árstíðasveifla sjávarhita í efstu 50 metrunum í kringum Ísland var orðin stöðug. Hvössustu veðrin eru á veturna (sjá

⁸Forsendur um að vindur sé stöðugur með tíma og blási úr einni átt eru uppfylltar. Erfitt er að líkja eftir forsendu um að enginn núningur sé við botn.

mynd 32(a)) og til að líkja eftir vetrarástandi var líkanið síðan keyrt með gildum fyrir janúarmánuð 1995 og eftir það með stöðugum vindi úr sömu átt í 10 daga. Til samanburðar var önnur keyrsla sett upp á sama hátt en í stað 10 daga með stöðugum vindi voru 10 dagar án vinds.

Jaðarskilyrði voru eins og í staðalkeyrslunni sem fjallað er um í kafla 3. Daglegu gögnin voru unnin upp úr gögnum úr ERA40 greiningu Evrópska reiknisetursins (ECMWF). Nánar er fjallað um daglegu gögnin í kafla 6. Önnur yfirborðsgögn voru þau sömu og í staðalkeyrslunni en þau voru unnin úr lofthjúpsgreiningum ECMWF og NCEP.

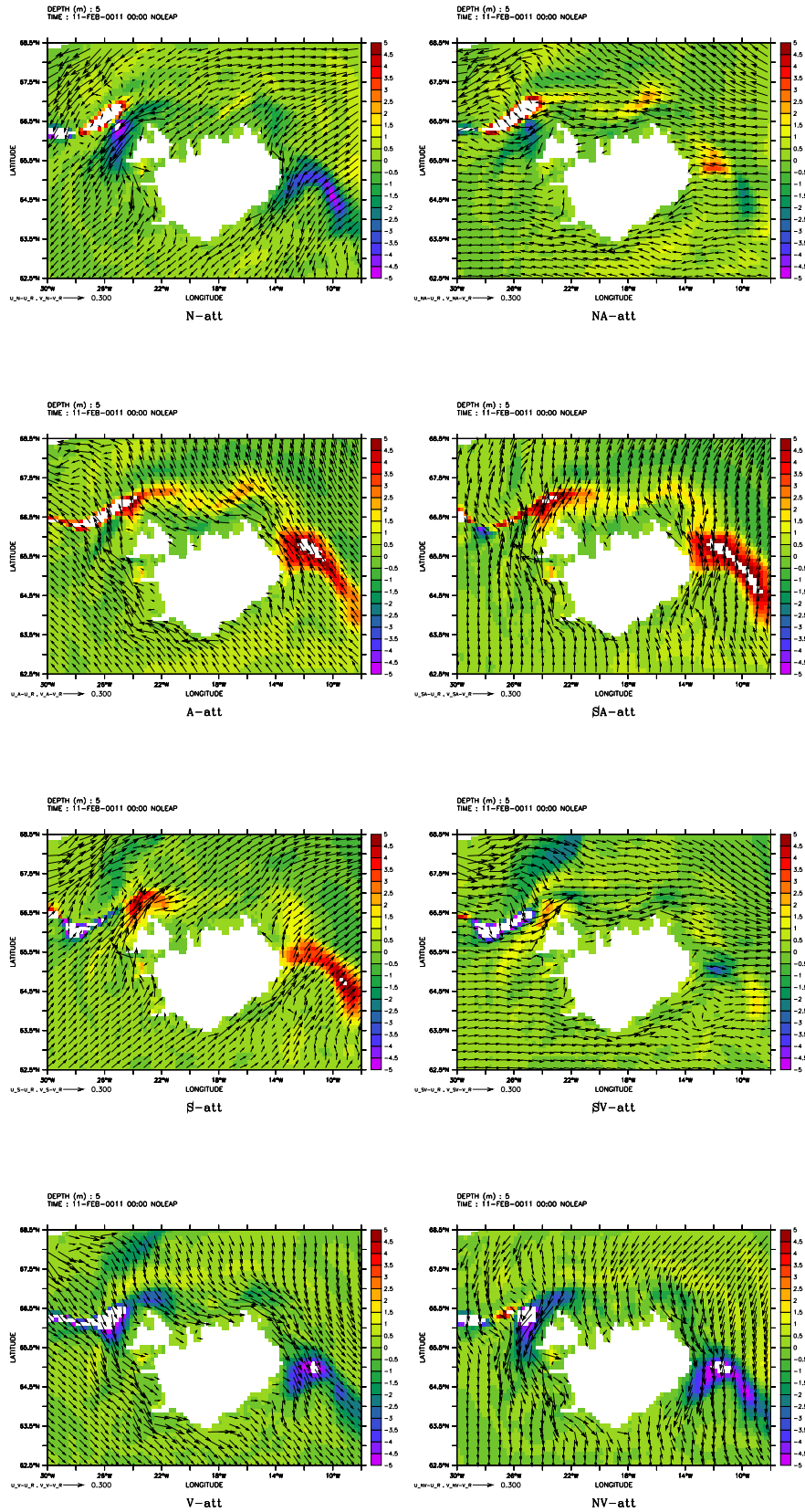
Til að skoða áhrif af raunverulegu veðri var sett upp tilraun þar sem vindasvið var skilgreint út frá gildum 13. janúar 1995. Þá ríkti tiltölulega hvöss SV-átt (sjá mynd 25) sem stóð yfir í 2-3 daga. Gildin yfir landinu eru suðvestlæg en gildi fyrir utan rammann, sem sýndur er á myndinni, geta haft aðra stefnu. Tvær mismunandi keyrslur voru gerðar, önnur með 10 daga SV-átt en til viðmiðunar var hin án vinds. Líkanið var sett upp á sama hátt og áttfestukeyrslurnar. Það var keyrt með daglegum gildum vindspennu og hita frá 1995 uns árstíðasveifla sjávarhita var orðin stöðug. Flæðið var þvingað með vind- og hitagögnum fyrir 1.-12. janúar 1995, síðan var 13. janúar endurtekinn tíu sinnum og að lokum vöru gögnin frá 14. janúar - 31. mars notuð.

5.3 Niðurstöður

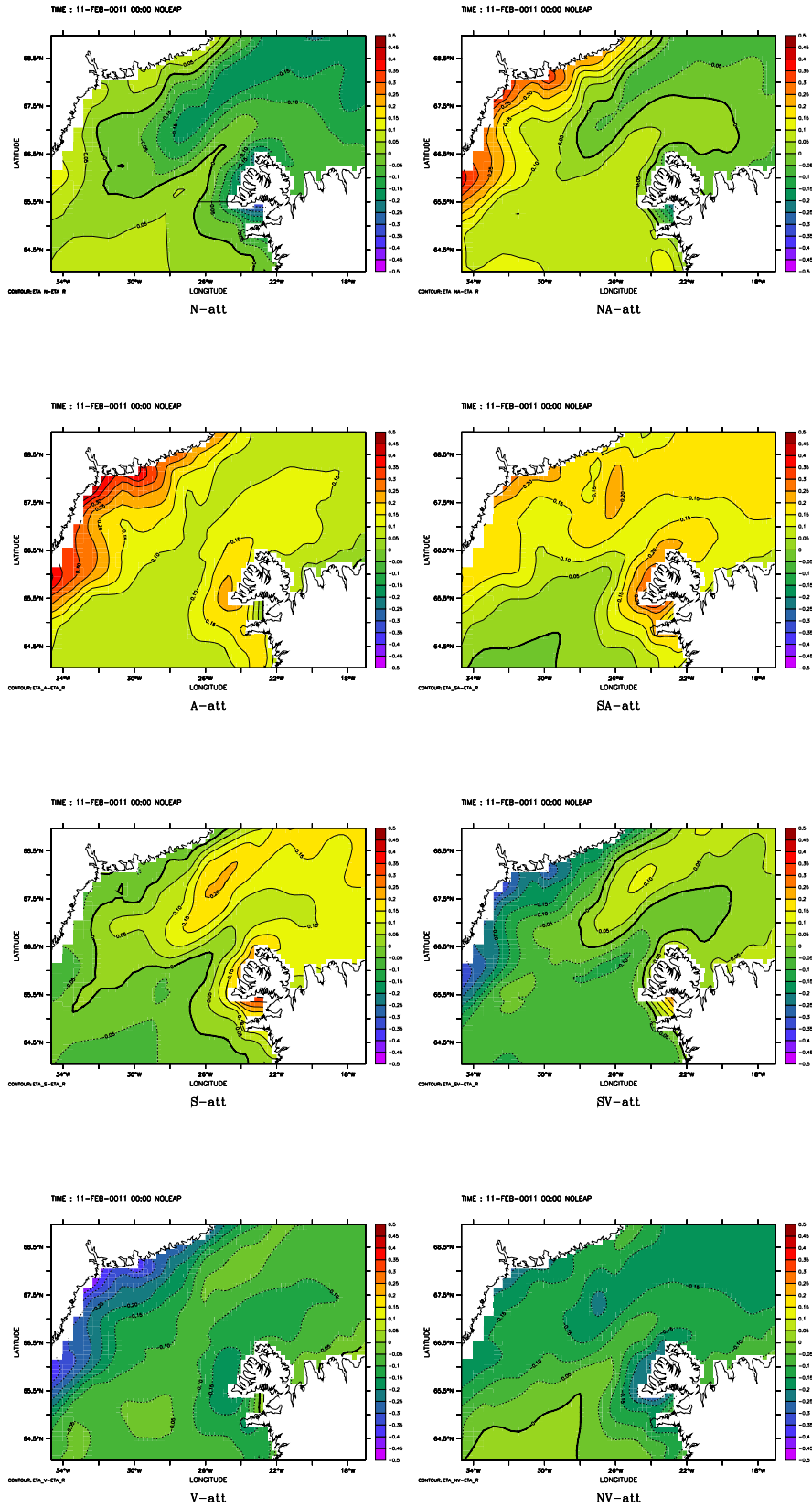
Mynd 26 sýnir hita og straum í yfirborði eftir 10 daga hvassa og stöðuga N-, NA-, A-, SA-, S-, SV-, V- og NV-átt. Vegna óvissu um stöðugleika upphafsástandsins var gerð sérstök viðmiðunarkeyrsla þar sem flæðið var þvingað án vinds í 10 daga. Til að sjá áhrif vindþvingunarinnar var viðmiðunarsviðið dregið frá.

Mestu áhrifin á sjávarhita eru á skilunum fyrir norðvestan og austan landið. Almenn valda austlægu áttirnar (NA-, A- og SA-áttir) jákvæðu hitafrávikum á skilunum og vestlægu áttirnar (SV-, V- og NV-áttir) neikvæðu frávikum. Hita-breytingarnar eru mismiklar eftir áttum. Hversu mikil breytingin er ræðst af straumstefnu miðað við staðsetningu skilanna. Fyrir austan landið er hitafrávikum annaðhvort neikvætt eða jákvætt nema í NA-átt og SV-átt en það eru einu áttirnar þar sem straumurinn liggur beint að eða frá landi. Þegar straumstefnan er norðlæg (N-, V- og NV-átt) færast skilin sunnar og þá verður kólnun við skilin. Þegar straumstefnan er suðlæg (S-, A- og SA-átt) færast skilin norðar og það verður hlýnun við skilin.

Fyrir norðvestan landið er straumsviðið ekki eins einsleitt. Greinilegt er að iða yfir Íslands-Grænlandshryggnum veldur því að áhrifin á staðsetningu skilanna eru ekki eins auðskilin. Minnst er iðan í V- og A-áttum og því samfara er straumur úr norðri (í V-átt) og úr suðri (í A-átt). Straumur til suðurs veldur flutningi skilanna til suðurs og lækkunar á sjávarhita á svæðinu en straumur til norðurs verður til að hækka sjávarhita.



Mynd 26: Straumur og hiti við yfirborð eftir 10 daga af stöðugum vindi úr N, NA, A, SA, S, SV, V og NV. Viðmiðunarsvið (10 dagar án vinds) hefur verið dregið frá. Örvarnar undir myndunum tákna vigra sem hafa stærðina 30 cm/s.



Mynd 27: Hæð sjávar miðað við viðmiðunarflöt (jafnmættisflöt) eftir 10 daga af stöðugum vindi úr N, NA, A, SA, S, SV, V og NV. Sjávarhæð viðmiðunarsviðs er dregin frá.

Engar vísbendingar fundust um aukningu á lóðréttri blöndun (uppstreymi eða niðurstreymi) samfara hvassviðraköflunum en það er ekki útilokað að einhverstaðar gæti áhrifa hennar. Mestu breytingarnar í hitasviðinu er hægt að útskýra með tilfærslu skila milli hlýrra og kaldra sjógerða. Hvort kólnun eða hlýnun verður í ákveðnum áttum er háð staðsetningu skilanna hverju sinni og þess vegna háð upphafsástandinu. Upphafsástandið er svipað og sýnt er efst á mynd 28.

V-áttin veldur hitalækkun á sömu stöðum og A-áttin veldur hitahækkun. Við hitaskilin kemur neikvæður hitamunur fram fyrir sunnan það svæði sem jákvæður hitamismunur kemur fram á. Þetta er í samræmi við þá ályktun að það sé fyrst og fremst tilfærsla á skilunum sem veldur hitabreytingunum. Á sama hátt virðist N-áttin vera spegilmynd S-áttarinnar, SV-áttin spegilmynd NA-áttarinnar og SA-áttin spegilmynd NV-áttarinnar. Í öllum tilvikum koma áhrifin á sjávarhita ekki fram á nákvæmlega sömu stöðum. Áhrif S- og N-áttanna er hægt að setja í samband við streymi Atlantssjávar norður fyrir Vestfirði. N-áttin minnkar innstreymi Atlantssjávar og S-áttin eykur innstreymið. Við ströndina verður kólnun í N-áttum en hlýnun í S-áttum.

Stefna straumsins í yfirborðslaginu er almennt til hægri við vindstefnuna nema nálægt ströndinni. Strandlengjan myndar jaðar og breytingar á sjávarstöðu valda straumum samsíða ströndinni. Þar sem dýpi er minna er einnig ólíklegt að forsenda um engan núning við botn sé í gildi. Suðvestur af landinu mynda straumvigrarnir 45° horn miðað við stefnu vindsins, sjá mynd 26. Það er í samræmi við lausnir Ekmans, sjá jöfnu 20. Fyrir norðaustan landið er hornið sem straumvigrarnir mynda miðað við vindstefnuna á bilinu $45\text{--}90^\circ$. Norðvestur og suðaustur af landinu, þar sem dýpið er minna yfir Íslands-Grænlands- og Íslands-Færeyjahryggnum, er straumsviðið flóknara. Á báðum stöðum er iða til staðar, sérstaklega á Grænlandssundi. Eins og áður sagði er iðan þar mikil í öllum áttum nema í V- og A- átt. Sama gildir um sviðið milli Íslands og Færeyja, en iðan þar er minni.

Ef norðlægu (N-, NA- og NV-átt) og suðlægu (SA-, S- og SV-átt) áttirnar eru skoðaðar sérstaklega með tilliti til flæðis í gegnum Grænlandssund (yfir Íslands-Grænlandshrygginn) kemur í ljós munur á straumnum Grænlands- og Íslandsmegin. Í N- og NV-átt er mikill straumur til suðvesturs með strönd Vestfjarða en minni í NA-átt. Hinum megin við sundið er straumurinn mestur í N- og NA-átt en minni í NV-átt. Í S- og SA-átt er straumurinn mikill til norðausturs úti fyrir strönd Vestfjarða en ekki eins mikill í SV-átt. Hinum megin við sundið er straumurinn mikill til norðausturs í S-átt en til norðurs í SA-átt og austurs í SV-átt. Þetta bendir til samspils milli stranda landanna og botnlögunar á sundinu sem erfitt er að útskýra. Til að skoða betur hvað er að gerast er sjávarhæð yfir sundinu sýnd á mynd 27.

Til að skoða flæðið úti fyrir Vestfjörðum skoðum við η á línunni sem liggur eftir 65.5°N , milli 26.5°W og 24.5°W . Í norðan og norðvestan átt er $\Delta\eta$ um $-0.10\text{ m}/1^\circ$, en minna en $-0.05\text{ m}/1^\circ$ í norðaustanátt. Þetta skýrir hvers vegna það er meiri straumur til suðvesturs í norðan og norðvestanátt en í norðaustanátt. Straumurinn virkar á móti Irmingerstraumnum og getur þar af leiðandi haft

hamlandi áhrif á innflæði Atlantssjávar til Norðurmiða.

Í sunnan og suðaustan átt er $\Delta\eta$ um $+0.10$ m/ 1° , en minna en $+0.05$ m/ 1° í suðvestanátt. Af þessu leiðir að straumurinn til norðausturs fyrir utan Vestfirði er meiri í sunnan- og suðaustanáttinni. Almennu hafa suðlægu áttirnar jákvæð áhrif á innstreymi Atlantssjávar á Norðurmið með Irmingerstraumnum en sunnan- og suðaustanáttir eru sérlega hagstæðar streymi norður fyrir Vestfirði.

Mynd 27 bendir til þess að NV-átt sé óhagstæðari en NA-átt fyrir flæði norður með Vestfjörðum. Við norðurströndina er mikill straumur með Norðurlandi til vesturs í norðaustanátt en í norðvestanátt er straumur úr norðri í átt að landi, sjá mynd 26. Norðaustanáttin hefur því takmarkandi áhrif á útbreiðslu Atlantssjávarins austur með ströndinni en í norðvestanátt er hugsanlega aðstreymi kaldra sjógerða úr Íslandshafi inn á Norðurmið. Þessi mismunur getur haft áhrif á strauma og ástand hafsins til lengri tíma. Mynd 27 bendir til þess að SA-átt sé hagstæðari en SV-átt fyrir flæði norður með Vestfjörðum. Á mynd 26 sést að í suðvestanátt er sterkur straumur til austurs með norðurströndinni. Í suðaustanátt er straumur til norðurs frá ströndinni. Suðvestanáttin eykur því á útbreiðslu hlýsjávarins austur með strönd Norðurlands.

Mynd 28 sýnir hita og straum í yfirborði eftir 10 daga SV-átt (mynd 28(c)) og 10 dögum eftir að veðrið gengur niður (mynd 28(d)) ásamt hita og straumi í viðmiðunarkeyrslu (myndir 28(a) og 28(b)). Vindasviðið er skilgreint út frá sviðinu þann 13. janúar 1995 (sjá mynd 25). Áhrif á strauma eru greinileg bæði á stærð og stefnu. Stefnan er yfirleitt til hægri við vindstefnuna og fyrir suðvestan landið er straumstefnan 45° til hægri við vindstefnu þegar viðmiðunarsvið hefur verið dregið frá, sjá mynd 28(e), eins og í hinum tilraununum.

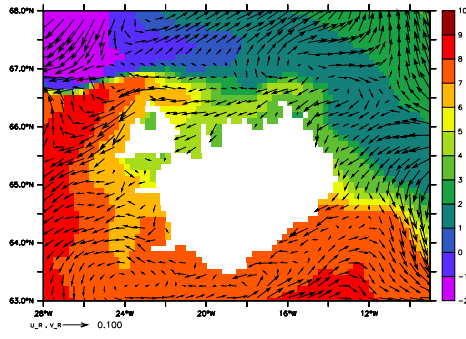
Áhrif á sjávarhita eru ekki eins útbreidd og á myndum 26 en það ber að hafa í huga að notaður er annar skali á myndum 28(e) og 28(f). Eftir 10 daga sterka SV-átt kemur fram mikil hitabreyting við skilin norðvestur af Vestfjörðum (sjá mynd 28(e)). Í efra horninu til vinstri á mynd 28(c) (fyrir norðvestan landið) sést að straumurinn er til suðurs og skilin milli Atlantssjávarins og pólsjávarins eru sunnar en á mynd 28(a) sem sýnir viðmiðunarsviðið. Fyrir norðan landið er straumurinn til austurs og áhrifin eru þau að fyrir norðan 66.5°N verður kólnun vegna þess að meira af köldum sjó fer til austurs úr Austur-Grænlandsstraumnum yfir í Íslandshaf. Fyrir sunnan 66.5°N verður hlýnun vegna þess að meira af hlýjum sjó berst austur með ströndinni.

Þegar veðrið gengur niður og bæði svið hafa fengið sömu vindþvingun í 10 daga, sjá myndir 28(b), 28(d) og 28(f), sést lítill munur á straumnum. Straumsviðin í SV-keyrslu og viðmiðunarkeyrslu eru nánast þau sömu. Enn er nokkur munur á staðsetningu skilanna, sést hann á myndinni sem sýnir hitamismun í keyrslunum (mynd 28(f)). Við skilin eru straumar sem hægt er að útskýra með því að breytingar hafa orðið á eðlisþyngdardreifingu og sviðið er að aðlagast nýju jafnvægi. Það sést einnig nokkur munur á straumum fyrir norðaustan landið en það er líklega vegna breytinga á eðlismassadreifingu fyrir austan svæðið sem myndin sýnir.

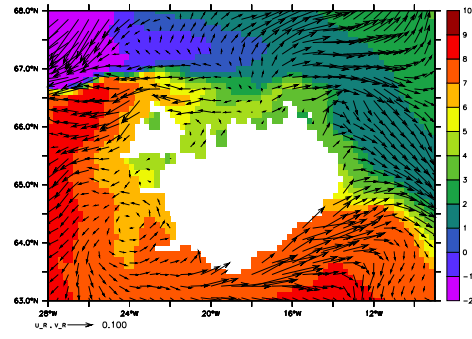
5.4 Umræða

Á mynd 26 sést að S-átt setur af stað straum til norðausturs, SV-átt setur af stað straum til austurs eða jafnvel suðausturs og SA-átt setur af straum til norðurs. Flæðið úti fyrir Vestfjörðum er í öllum tilvikum til norðnorðausturs eða norðausturs. Á myndinni sést að straumur meðfram Vestfjörðum er sterkari í tilvikum S- og SA-átta heldur en SV-áttar. Almennt auka sunnanáttir flæði Atlantssjávar norður fyrir Vestfirði en þær norðlægu minnka það. Innbyrðis stefnur eru þó mis-hagstæðar fyrir innflæðið en þegar meðaltal er tekið yfir lengri tíma koma þessi áhrif ekki fram.

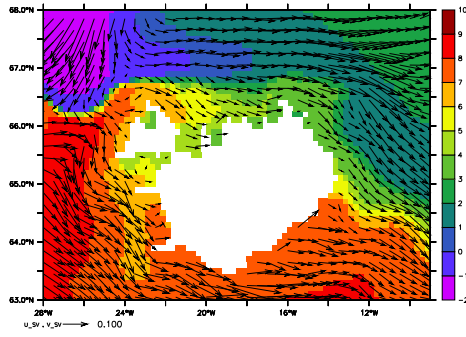
Á mynd 26 sést að NA-átt setur af stað straum til vesturs eða jafnvel norð-vesturs. Með sama hætti kemur SV-átt af stað straumi til austurs eða jafnvel suðausturs. Á Grænlandssundi, vestan megin streymir sjórinn í sömu átt og vindurinn, samsíða strönd Grænlands. Það mætti hugsa sér 3 daga samfellda SV-átt sem tæki við af 3 daga samfelldri NA-átt. Vindþvingun þessa sex daga er að meðaltali engin. Ef litið er til straums dag frá degi má af mynd 26 ráða að fyrstu 3 dagana berist vatnsmassi til suðvesturs en seinni 3 dagana berist massinn til austurs eða austnorðausturs. Eftir 6 daga hefur pólsjór því borist nokkurn spöl til suðausturs. Ef reiknað er með meðalvindálagi berst sjórinn ekkert þessa 6 daga. Af þessu dæmi er ljóst að áhrif á flæðið eru ekki þau sömu eftir því hvort það er þvingað með daglegum vindi eða með meðalvindi. Fjær landi, þar sem dýpi er meira og áhrifa strandarinnar gætir ekki, hefur þetta ekki áhrif.



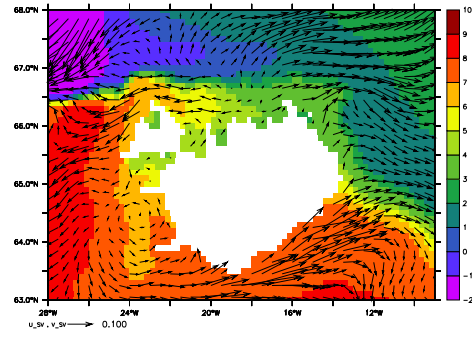
(a) Ref : 10 d



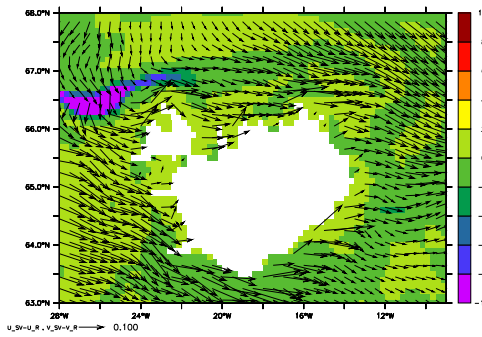
(b) Ref : 20 d



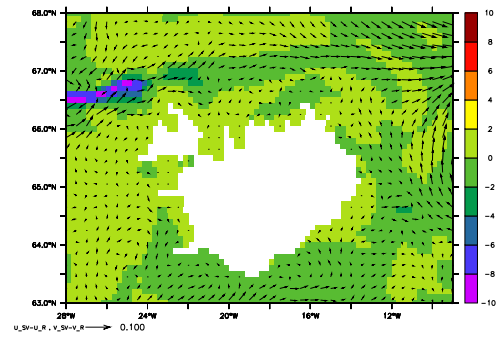
(c) SV : 10 d



(d) SV : 20 d



(e) SV - Ref : 10 d



(f) SV - Ref : 20 d

Mynd 28: Hiti ($^{\circ}\text{C}$) og straumur (m/s) í yfirborði eftir 10 daga af sterkri SV átt (c) og 10 dögum síðar (d). Viðmiðunarsvið (flæði án vinds) er sýnt efst á myndinni (a og b). Neðst á myndinni má sjá mismun hita- og straumsviðs (e og d). (Viðmiðunarsvið er dregið frá SV-sviði).

6 Áhrif mismunandi tímaupplausnar vindasviðs

Í staðalkeyrslunni er meðalárstíðasveifla notuð til að ná fram meðalástandi sem hægt er að nota sem grunn fyrir aðrar keyrslur. Sem lið í að færa líkanið nær raunástandi var ákveðið að skoða hvaða áhrif mismunandi tímaupplausn þvingunargagna getur haft á niðurstöðurnar. Til að skoða meðaltöl reiknaðra eðlisþátta í líkaninu (til dæmis meðaltal 1-3 mánaða) er fullnægjandi að nota mánaðarlega þvingun, þ.e. þvingunargildi sem eru fasti í mánuð. Þegar skoða á eðlisþætti yfir styttri tímabil (minni en einn mánuður) er þörf á að nota þvingun sem hefur hærri upplausn í tíma.

Vindasvið er vigurstærð og krafturinn sem verkar á yfirborð sjávar er í hlutfalli við stærð vigursins í hverjum punkti. Fyrir daglega þvingun er krafturinn í hlutfalli við stærðina reiknaða út frá x- og y-þáttum hvers dags. Mánaðarmeðaltöl vindasviðs eru fundin með því að reikna meðaltal x- og y-þátta og krafturinn er í því tilviki í hlutfalli við stærð meðalþáttanna. Stærð reiknuð út frá mánaðarmeðaltölum x- og y-þátta hefur ekki sama gildi og mánaðarmeðaltal þeirrar stærðar sem reiknuð er út frá daglegum gildum. Þess vegna getur verið munur á þeirri orku sem fer í að þvinga flæðið eftir því hvort um daglegan eða mánaðarlegan breytileika vindasviðs er að ræða.

6.1 Fræði

Núningskrafturinn sem verkar á rúmmálseiningu vökva er

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \tau}{\partial z}$$

þar sem $\tau = (\tau_x, \tau_y)$ er núningsspenna. Við yfirborð er núningsspennan vegna vindþvingunar jöfn vindspennunni. Aflið á flatarmálseiningu við yfirborð er

$$P = \tau_s \cdot u$$

Þar sem τ_s er vindspennan og u er láréttur hraði. Daggildi spennunnar τ er hægt að skrifa sem fall af mánaðargildi hennar $\bar{\tau}$ og daglegum breytileika τ' .

$$\tau = (\tau_x, \tau_y) = (\bar{\tau}_x + \tau'_x, \bar{\tau}_y + \tau'_y)$$

Einnig er hægt að skrifa u á sama hátt. Aflið sem fer í að knýja flæðið er breytilegt eftir því hvort að mánaðarleg eða dagleg gögn eru notuð. Meðalaflið fyrir heilan mánuð er

$$\bar{P}_d = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L \tau \cdot u = \bar{\tau} \bar{u} + \overline{\tau' u'}$$

ef dagleg gildi eru notuð (L er lengd mánaðarins) en

$$\bar{P}_m = \bar{\tau} \bar{u}$$

ef mánaðaleg gildi eru notuð. Meðalvindaflið fyrir heilan mánuð er í hlutfalli við

$$\overline{|\tau|} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L |\tau|$$

ef dagleg gildi eru notuð en í hlutfalli við

$$|\overline{\tau}| = |\overline{\tau}_x + \overline{\tau}_y|$$

ef mánaðaleg gildi eru notuð. Hlutfallið

$$(\overline{|\tau|} - |\overline{\tau}|) / \overline{|\tau|} = 1 - |\overline{\tau}| / \overline{|\tau|} \quad (24)$$

er mælikvarði á mismuninn og hlutfallið

$$|\overline{\tau}| / \overline{|\tau|}$$

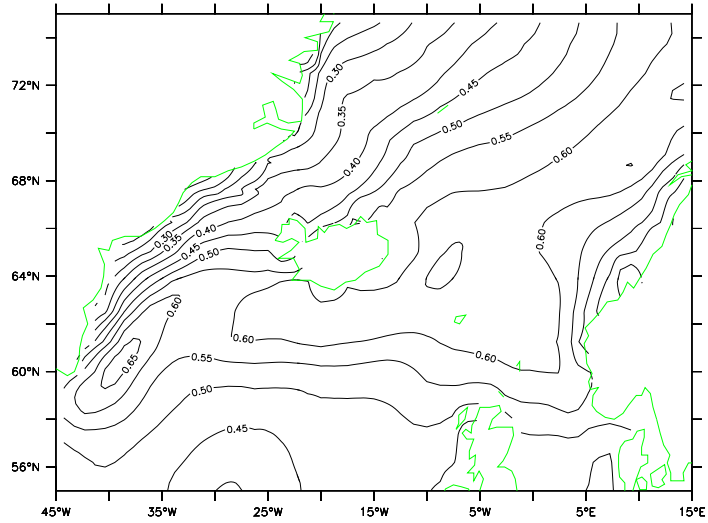
sýnir eins konar áttfestu (Trausti Jónsson, 2002). Hlutfallið verður stærst 1 en þá er enginn daglegur breytileiki og $P_d = P_m$. Þegar hlutfallið er lágt er mikill daglegur breytileiki í vindátt. Þá fer það eftir gildinu $\tau' u'$ hvort fram kemur munur á aflinu sem fer í að knýja flæðið. Hægt er að skrifa

$$\tau' u' = |\tau'| |u'| \cos(\tau', u')$$

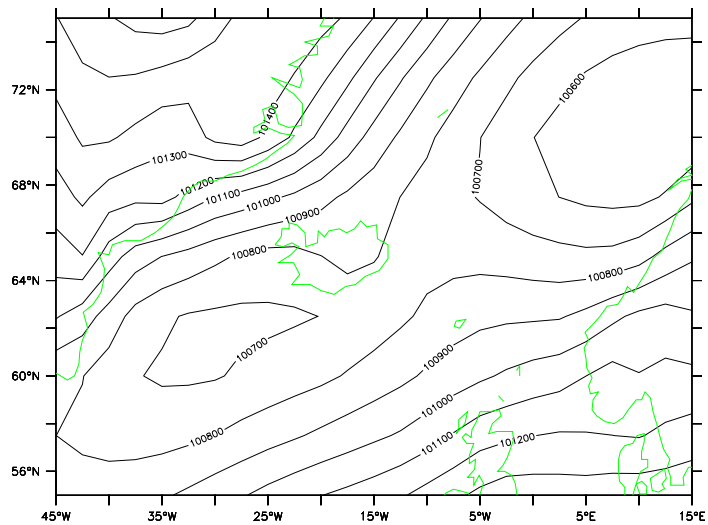
Ef hornið á milli τ' og u' er 90° er $P_d = P_m$, ef hornið er minna en 90° þá er $P_d > P_m$ og ef það er stærra en 90° er $P_d < P_m$.

Mynd 29 sýnir mismun á meðalstærð vindspennunnar 1995 annars vegar reiknaðri út frá dagsmeðaltölum og hins vegar reiknaðri út frá mánaðarmeðaltölum. Mismunurinn er skalaður með meðalstærð spennunnar reiknaðri með daglegum gildum, sjá jöfnu 24. Hlutfallið er reiknað fyrir hvern mánuð ársins 1995, síðan er ársmeðaltal þess fundið og er það sýnt á myndinni. Ef daglegu gildin eru lítið frábrugðin mánaðargildinu (mánaðarmeðaltalinu) er hlutfallið sem sýnt er á myndinni lítið. Ef daglegu gildin sveiflast mikið frá mánaðargildinu er hlutfallið stórt. Fyrir norðan Ísland við austurströnd Grænlands er hlutfallið lítið en eykst suður í átt að Íslandi og er í hámarki fyrir sunnan landið (~ 0.6), yfir Noregshafi og við syðsta odda Grænlands. Þar sem lægðir ganga yfir er mikill breytileiki í vindátt. Mynd 30 sýnir meðalloftþrýsting við sjávarmál 1995. Meðaltalið er reiknað út frá mánaðarmeðaltölum. Minnstur er þrýstingurinn fyrir suðvestan Ísland, yfir Grænlandshafi og fyrir vestan Noreg, yfir Noregshafi. Staðsetning lægðabrautarinnar er í samræmi við þau svæði þar sem mestur daglegur breytileiki er til staðar samkvæmt mynd 29.

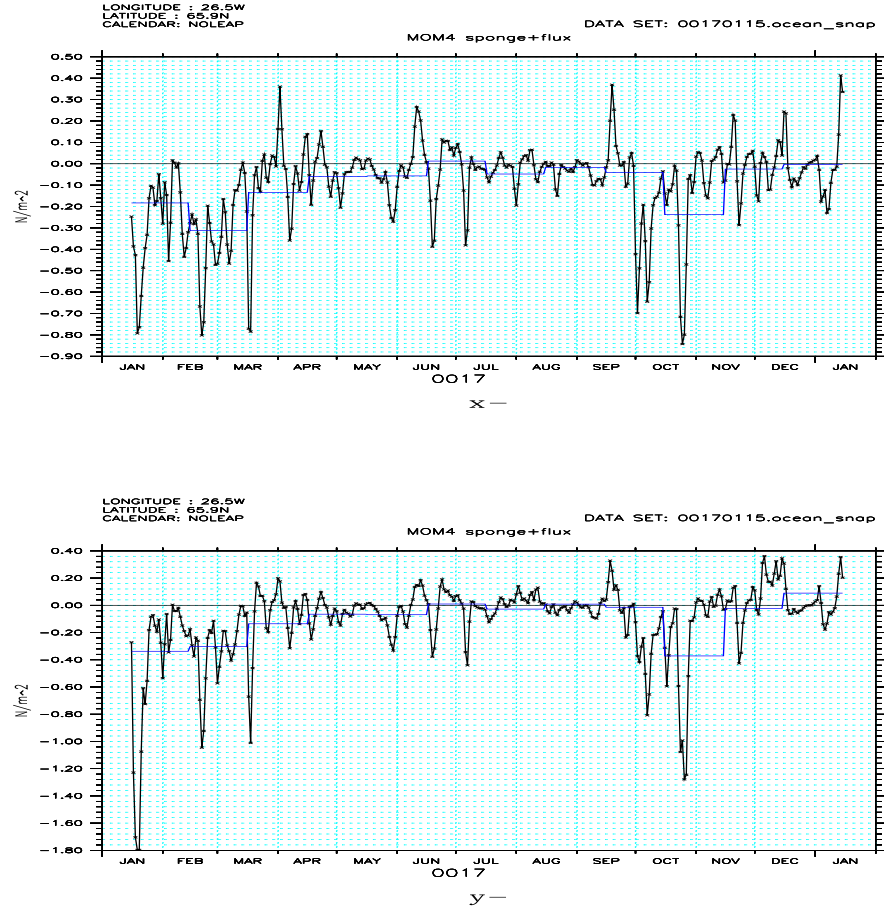
Þar sem er mikill daglegur breytileiki getur verið munur á aflinu sem fer í að knýja flæðið. Eins og áður sagði fer það þó eftir horninu milli τ' og u' hvort svo sé. Ef gert er ráð fyrir að aflið sé meira þegar um mikinn daglegan breytileika er að ræða, er ekki hægt að staðhæfa fyrir fram að slíkt skili sér í auknum meðalstraum. Einfaldast er að kanna áhrif mismunandi tímaupplausnar í líkaninu.



Mynd 29: Hlutfallslegur munur á því vindafla sem fæst með dagsmeðaltölum og mánaðarmeðaltölum. Hlutfallið er reiknað með jöfnu 24 fyrir hvern mánuð og síðan er ársmeðaltal þess reiknað.



Mynd 30: Meðalþrýstingur (Pa) við sjávarmál árið 1995.

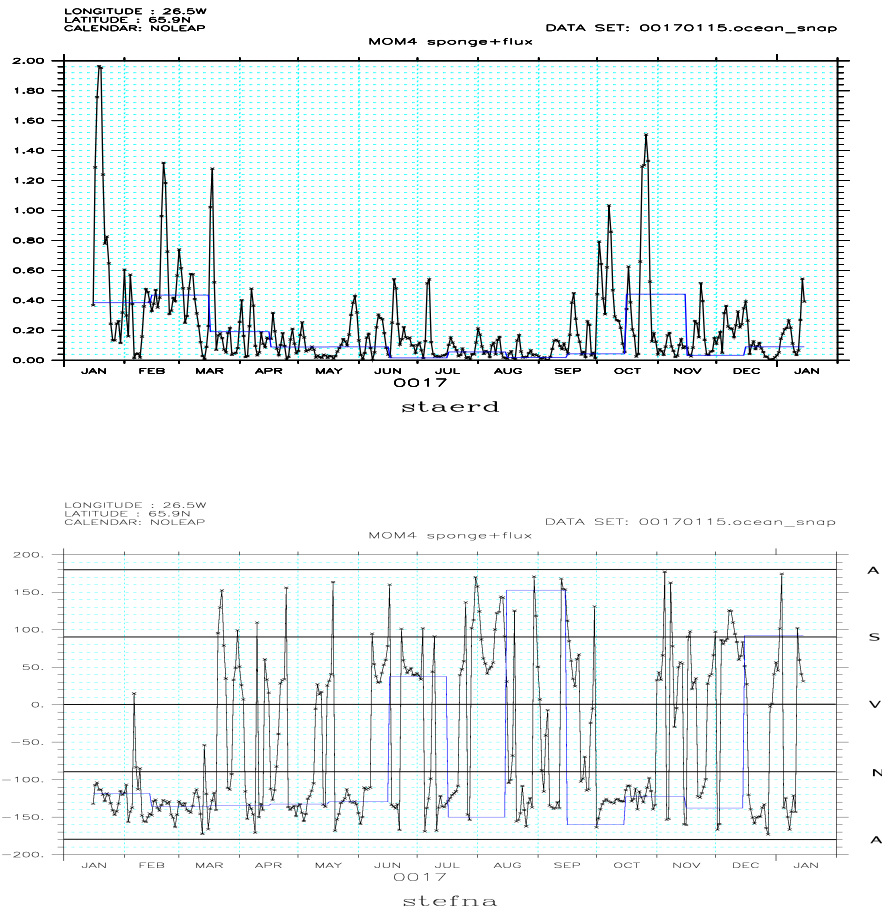


Mynd 31: Vindspenna, x- og y-páttur, í punktinum 65°54'N og 26°29'W (stöð 6 á Látrabjargssniði) fyrir hvern dag líkanársins. Svartur litur: Gildi sem notuð eru í keyrslu með gögnum byggðum á dagsmeðaltölum. Blár: Gildi sem notuð eru í keyrslu með gögnum sem byggja á mánaðarmeðaltölum.

Eins og rætt var um í lok kafla 5 þá hefur ströndin og botnlögun við Ísland áhrif á strauma við landið. Þetta gerir það að verkum að mismunandi áttir eru mishagstæðar fyrir innflæði Atlantssjávar inn á Norðurmið. Mynd 32 sýnir vindspennu árið 1995 norðvestur af Látrabjargi. Þar sést að suð- og suðvestlægar stefnur eru algengari en suðaustlægar. Í kaflanum kom fram að SA-átt er mun hagstæðari innflæðinu en hún hefur minna vægi í mánaðarmeðaltali.

6.2 Uppsetning tilraunar

Til að kanna áhrif mismunandi tímaupplausnar voru gerðar tvær keyrslur. Báðar keyrslurnar eru settar upp á sama hátt og staðalkeyrslan sem fjallað er um í kafla 3. Upphafsskilyrði, ytri jaðarskilyrði og reikninet er það sama en jaðarskilyrði við



Mynd 32: Vindspenna, stærð og stefna, í punktinum 65°54'N og 26°29'W (stöð 6 á Látrabjargssniði) fyrir hvern dag líkanársins. Svartur litur: Gildi sem notuð eru í keyrslu með gögnum byggðum á dagsmeðaltölum. Blár: Gildi sem notuð eru í keyrslu með gögnum sem byggja á mánaðarmedaltölum.

yfirborð (þvingunargögn) eru ekki þau sömu. Í stað meðalárstíðasveiflu fyrir vind og hita eru notuð gögn frá 1995 úr ERA40 greiningu Evrópska reiknisetursins (ECMWF). Selta, úrkoma og uppgufun eru eins og í staðalkeyrslunni. Dagleg gildi fyrir hita og vind voru sótt til Evrópska reiknisetursins og úr þeim voru unnin dags- og mánaðarmedaltöl. Önnur keyrslan var þvinguð með gögnum sem byggja á mánaðarmedaltölum (mánaðarkeyrsla) og hin með gögnum sem byggja á dagsmeðaltölum (dagskeyrsla).

Vindgögnin eru vindspenna (*e. wind stress*). Þau koma úr Lofthjúpslíkani ECMWF og eru reiknuð í hverju tímaskrefi út frá vindgildum í 10 m hæð samkvæmt jöfnum 25 og 26. Lýsing gagnanna er í töflu 128 í gagnagrunni ECMWF og breytur tvær, x-þáttur (Instantaneous X surface stress IEWS) og y-þáttur (Instantaneous Y surface stress INSS), hafa númerin 229 og 230 og einingarnar

N/m² (Newton á fermeter).

Hiti við yfirborð sjávar kemur einnig úr lofthjúpslíkaninu. Lýsing gagnanna er í töflu 128 í gagnagrunni ECMWF og breytan hefur nafnið SSTK (Sea Surface Temperature), númerið 34 og einingarnar K (Kelvin).

Vindspennan er reiknað út frá vindgildum í lofthjúpslíkaninu samkvæmt eftirfarandi jöfnum.

$$\tau_x = \frac{\kappa \rho u_*}{\log\left(\frac{z_l + z_{0M}}{z_{0M}}\right) - \Psi_M\left(\frac{z_l + z_{0M}}{L}\right) + \Psi_M\left(\frac{z_{0M}}{L}\right)} u \quad (25)$$

$$\tau_y = \frac{\kappa \rho u_*}{\log\left(\frac{z_l + z_{0M}}{z_{0M}}\right) - \Psi_M\left(\frac{z_l + z_{0M}}{L}\right) + \Psi_M\left(\frac{z_{0M}}{L}\right)} v \quad (26)$$

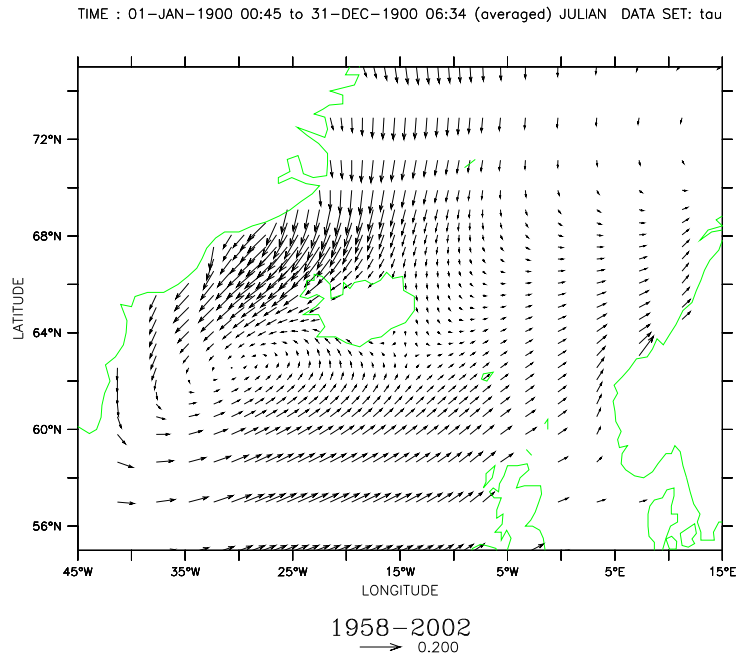
Þar sem $\tau = (\tau_x, \tau_y)$ er vindspenna við yfirborð og $u = (u, v)$ er vindur í 10 m hæð. u_* er viðnáms hraði (*e. friction velocity*), κ er von Kármán fastinn, z_l er hæð yfirborðslags lofthjúpsins (*e. surface boundary layer*), Ψ er stöðugleikafall, z_{0M} er hrýfislengd (*e. roughness length*) og L er kennilengd Obukhov. Spennan τ í n -ta tímaskrefi er reiknuð út frá u og v í n - og $(n+1)$ -ta tímaskrefi. Jöfnurnar lýsa lograferli milli gilda við yfirborð sjávar og gilda í 10 m hæð (sem er hæð yfirborðslagsins í lofthjúpslíkaninu). Hægt er að nálga þennan feril með annars og þriðja stigs margliðum. Sjá nánari útreikninga í viðauka B.

Í hverju tímaskrefi reiknar líkanið hita, seltu, straum og aðra eðlisþætti. Tímaskrefið er það sama í báðum keyrslum, 1200 s, tengingin við þvingunargögnin er hins vegar breytileg. Í dagskeyrslunni er hún 86400s (einn sólarhringur) en í mánaðarkeyrslunni er hún 2628000s (einn mánuður). Til að skoða hvaða gildi líkanið notar fyrir vindspennu á hverjum líkandegi var vindspennan skrifuð út í skrá á hverjum degi. Í mánaðarkeyrslunni notar líkanið meðalgildi vindspennunnar fyrir hvern mánuð í heilan líkanmánuð. Í dagskeyrslunni notar líkanið meðalgildi vindspennunnar fyrir hvern dag í heilan dag. Myndir 31(a) og 31(b) sýna hvað gerist í punktinum 65°54'N og 26°29'W (stöð 6 á Látrabjargssniði), sjá staðsetningu á mynd 10. Blái ferillinn sýnir gildin sem eru notuð í mánaðarkeyrslunni og sá svartí gildin sem eru notuð í dagskeyrslunni. Líkanið byrjar að reikna 15. janúar og ferillinn sem sýndur er á myndunum sýnir því gildi frá 15. janúar 1995 til 31. desember 1995 og endar svo á gildum frá 1-14. janúar 1995.

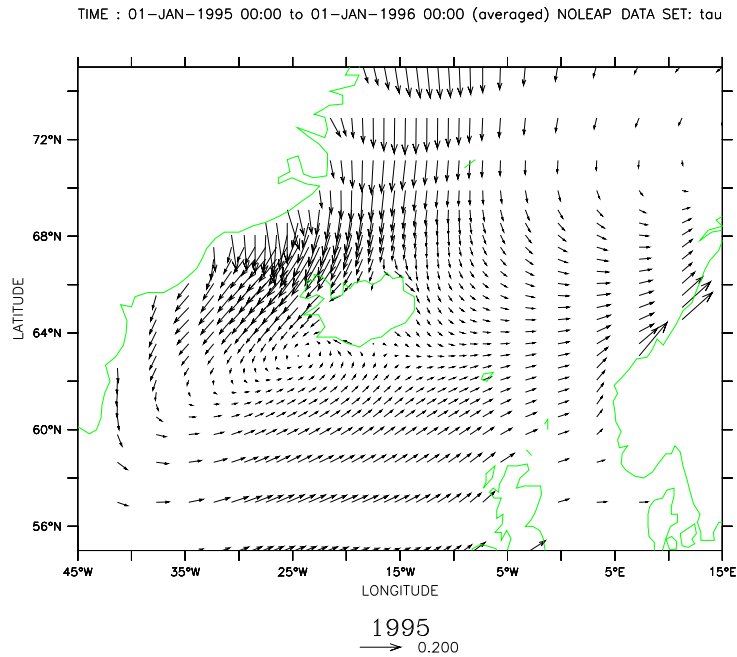
Eðlisþættir sem eru reiknaðir í hverju tímaskrefi eru skrifaðir út í skrá á hverjum líkandegi. Ein skrá er fyrir hvert ár sem líkanið er keyrt. Báðar keyrslurnar voru upphafsstilltar með gildum úr staðalkeyrslunni. Þær voru síðan keyrðar í 7 líkánár en þá var árstíðasveifla sjávarhita í kringum Ísland orðin stöðug.

6.2.1 Vindasvið og ástand sjávar 1995

Vindasvið ársins 1995 einkenndist af sterkum norðlægum vindi, sjá mynd 33(b). Í samanburði við vindasvið í staðalkeyrslunni, sjá mynd 33(a), er vindþvingunin mikil.



(a) Staðalkeyrsla - Vindspenna (N/m^2)



(b) 1995 - Vindspenna (N/m^2)

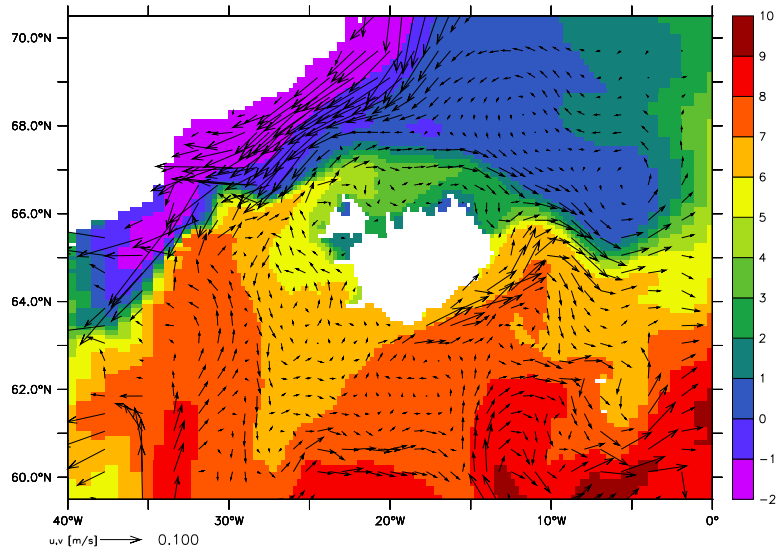
Mynd 33: (a) Meðalvindasvið í staðalkeyrslu, ársmeðaltal reiknað út frá mánaðar meðaltölum árána 1958-2002. (b) Meðalvindasvið ársins 1995, ársmeðaltal reiknað út frá mánaðar meðaltölum ársins 1995. Örvanar undir myndunum tákna vigra sem hafa stærðina 0.2 N/m^2 .

Mynd 6 í kafla 2 sýnir brúunargildi á 50 m dýpi veturinn 1995 (sjá umfjöllun um brúun sjávarmælinga í kafla 2). Það sem einkennir hitasviðið eru köld gildi fyrir norðan land ($0-1^{\circ}\text{C}$) og sterk hitaskil fyrir norðan Látrabjargssniðið. Meðaltal hita í vetrarleiðöngurum 1990-2000 er mun hærra, sjá mynd 7. Tunga af seltulitlum sjó teygir sig í suðaustur út frá Grænlandssundi og er í samræmi við köld gildi ($t < 0^{\circ}$). Seltusviðið er einsleitt fyrir norðan land og fyrir norðaustan landið eru gildi þar sem $s < 34.7$ einkennandi. Í megindráttum er þetta það sama og kemur fram í fjölriti Hafrannsóknastofnunarinnar (1995), *Þættir úr vistfræði sjávar*, þar sem greint er frá ástandi sjávar árið 1994-95. Þar kemur fram að ástandið á þessu tímabili hafi verið óvenjulegt sérstaklega fyrir norðan land og austan. Þar hafi hiti og selta verið undir meðallagi og greinilegt sé að innstreymi Atlantssjávar hafi verið í lágmarki. Tíðni N- og NA-átta var mikil í febrúar og mars, sjá mynd 32(b), og það takmarkar innflæði á Norðurmið. Steingrímur og Héðinn (2005) hafa áætlað að í febrúar og mars hafi nánast ekkert innstreymi Atlantssjávar verið á Norðurmið og það hafi verið undir meðallagi fram á sumar. Á mynd sem sýnir brúunargildi sjávarhita í vorleiðangri 1995, mynd 41(b) á blaðsíðu 63, sést að sjávarhiti var undir meðalagi fyrir norðan land. Skilin fyrir norðvestan landið hafa þó færst norðar og tunga af hlýjum sjó teygir sig norður fyrir Vestfirði.

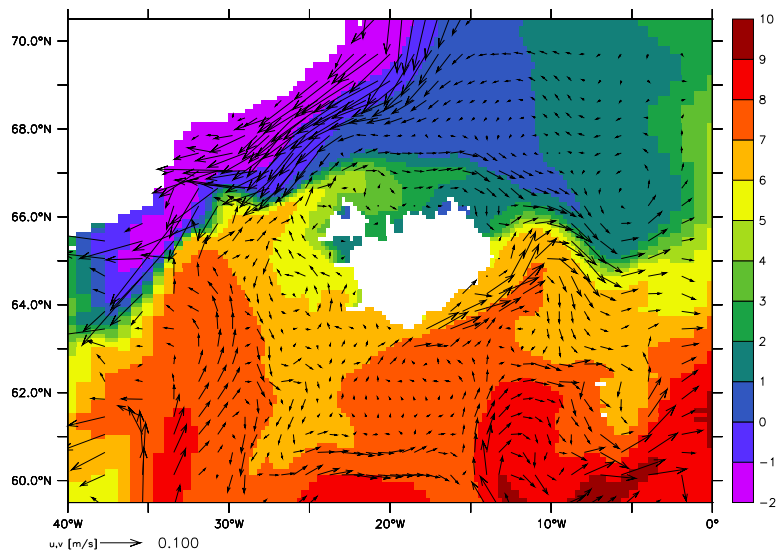
6.3 Niðurstöður

Mynd 34 sýnir ársmeðaltal hita og straums á 50 m dýpi þegar líkanið hefur verið keyrt í 7 ár. Mynd 34(a) sýnir gildin í keyrslu með þvingun byggðri á mánaðarmeðaltölum (mánaðarkeyrsla) og mynd 34(b) sýnir gildi í keyrslu með þvingun byggðri á dagsmeðaltölum (dagskeyrsla).

Ef mánaðarkeyrslan er borin saman við staðalkeyrsluna (sjá mynd 11 í kafla 3) sést lítill munur á helstu straumum og hitadreifingu. Við syðri jadarinn er útbreiðsla Atlantssjávarins örlítið meiri (það sést á jafnhitalínu fyrir 7°C suður af Reykjaneshrygg) í mánaðarkeyrslunni en í staðalkeyrslunni. Það er einnig minni straumur til norðausturs fyrir austan Reykjaneshrygginn í mánaðarkeyrslunni. Hins vegar er meiri straumur beint til norðurs upp að suðurströndinni fyrir vestan Færeyjar (á um 14°W) svo straumurinn með suðausturströnd Íslands, sem liggur til norðausturs með ströndinni, er af svipaðri stærðargráðu. Heit tunga fyrir sunnan Íslands-Grænlandshrygginn liggur sunnar á mynd 34(a) en á mynd 11 og bendir það til þess að styrkur Austur-Grænlandsstraumsins sé meiri í mánaðarkeyrslunni en í staðalkeyrslunni.

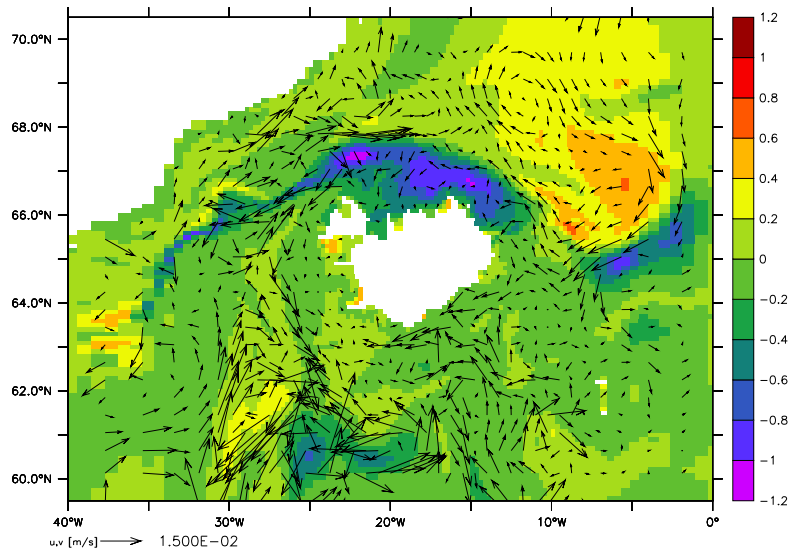


(a) Niðurstöður keyrslu með mánaðarmeðaltölum



(b) Niðurstöður keyrslu með dagsmeðaltölum

Mynd 34: Straumur (m/s) og mættishiti ($^{\circ}\text{C}$) á 0-50 m dýpi þegar flæðið hefur verið þvingað með hita og vindgögnum frá 1995. (a) Mánaðarmeðaltöl, (b) dagsmeðaltöl. Örvarnar undir myndunum tákna vigra sem hafa stærðina 10 cm/s.

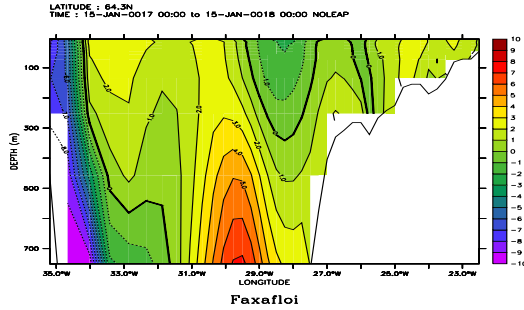


Mynd 35: Mismunur straums (m/s) og mættishita ($^{\circ}\text{C}$) á 0-50 m dýpi. Svið sem þvingað er með mánaðarmeðaltölum er dregið frá sviði sem er þvingað með dagsmeðaltölum. Örin undir myndinni táknar vigur sem hefur stærðina 1.5 cm/s.

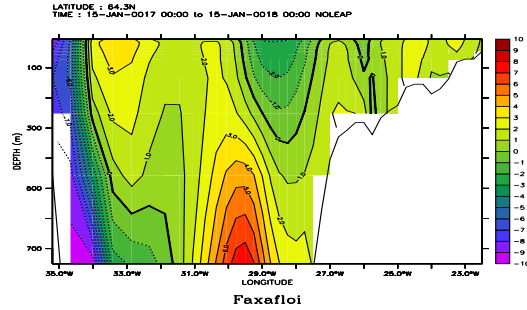
Á Íslandshafi eru skil milli hlýrra og kaldra sjógerða greinileg fyrir norðan Ísland. Á mynd 34(a) eru þau á nokkuð beinni línu sem liggur eftir $67^{\circ}30'\text{N}$ og er það nokkru sunnar en sést á mynd 11. Hringrásin fyrir austan Jan Mayen-hrygginn er sterkari þegar flæðið er þvingað með mánaðargögnum frá 1995 og það hefur áhrif á staðsetningu skilanna austur af landinu. Við ströndina eru þau svipuð í báðum keyrslum. Lengra frá landi sveigjast þau meira til suðurs í mánaðarkeyrslunni. Einnig er meiri straumur til suðurs í átt að Færeyjum (á um $9-8^{\circ}\text{W}$). Sviðið er líkara því sem sést á myndum 2 og 3 í kafla 2 og bendir það til þess að Austur-Íslandsstraumurinn komi betur fram í mánaðarkeyrslunni en í staðalkeyrslunni.

Helsti munurinn milli staðalkeyrslunnar og mánaðarkeyrslunnar er að styrkur Austur-Grænlandsstraumsins er meiri í mánaðarkeyrslunni. Myndir 33(a) og 33(b) sýna meðalvindasvið í keyrslunum. Vindasvið fyrir vestan Grænland á Norðurhafi er í báðum tilvikum norðlægt en það er sterkara í mánaðarkeyrslunni. Það veldur auknu Ekman-flæði upp að strönd Grænlands og massaflutningur til suðurs með Austur-Grænlandsstraumnum verður meiri. Aukið Ekman-flæði veldur lægra sjávarborði yfir Norðurhöfum og rangsælis hringrás á Íslandshafi verður greinilegri.

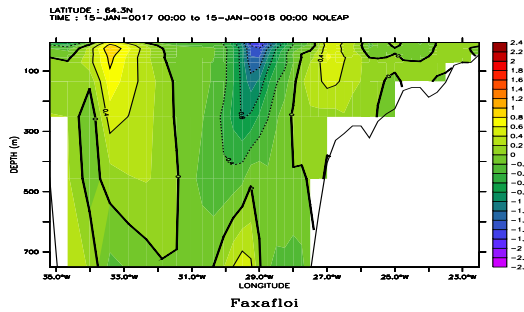
Séu myndir 34(a) og 34(b) bornar saman sést munur í útbreiðslu pólsjávar og svalsjávar á Íslandshafi og á Noregshafi. Á báðum myndum sést rangsælis hringrás



(a) Mánaðarmeðaltöl



(b) Dagsmeðaltöl

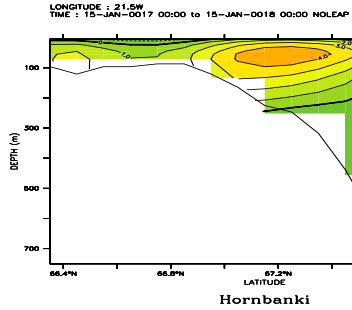


(c) Mismunur á (b) og (a).

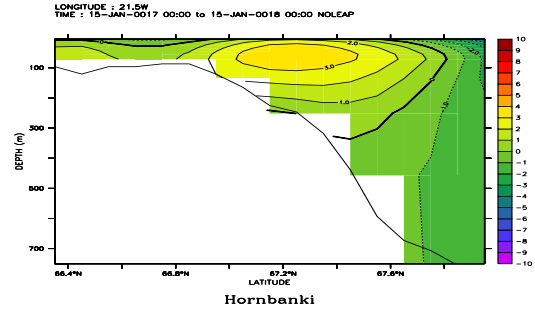
Mynd 36: Straumur (cm/s) í norður-suðurstefnu á Faxaflóasniði í keyrslu með daglegum og mánaðarlegum gögnum frá 1995. Staðsetning sniðsins sést á mynd 10. (a) Mánaðarmeðaltöl. (b) Dagsmeðaltöl. (c) Mismunur á straumi í keyrslu með daglegum og mánaðarlegum gögnum, (b)-(a).

á Noregshafi (fyrir austan Jan Mayen-hrygginn) og einnig hringrásin á Íslandshafi (fyrir vestan Jan Mayen-hrygginn). Mismunur hita og straums á 0-50 m dýpi er sýndur á mynd 35. Á henni sést réttsælis hringrás á Íslandshafi. Þetta bendir til þess að hin eiginlega rangsælis hringrás sé veikari þegar vindur tekur daglegum breytingum. Hugsanleg skýring á hærri hita í dagskeyrslunni er að minna berist af pólsjó úr Austur-Grænlandsstraumnum með Austur-Íslandsstraumnum en í mánaðarkeyrslunni. Straumstefna í mismunasviðinu til norðvesturs rétt fyrir utan íslensku landgrunnsbrúnina bendir einnig til þess að Austur-Íslandsstraumurinn sé veikari í dagskeyrslunni.

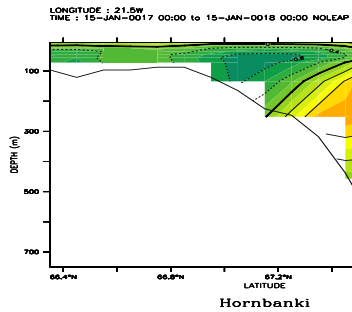
Fyrir norðan Ísland er meðalárshiti í dagskeyrslunni (mynd 34(a)) minni en í mánaðarkeyrslunni (mynd 34(b)). Sést það best á mynd 35 sem sýnir mismun á sjávarhita í keyrslunum. Þar sést mismunastraumur með suðlæga stefnu sem er vísbending um meira aðstreymi kaldra sjógerða inn á Norðurmið. Það tengist rangsælis hringrás yfir Grænlandshafi sem sést á myndinni. Hringrásin og jákvætt



(a) Mánaðarmeðaltöl



(b) Dagsmeðaltöl



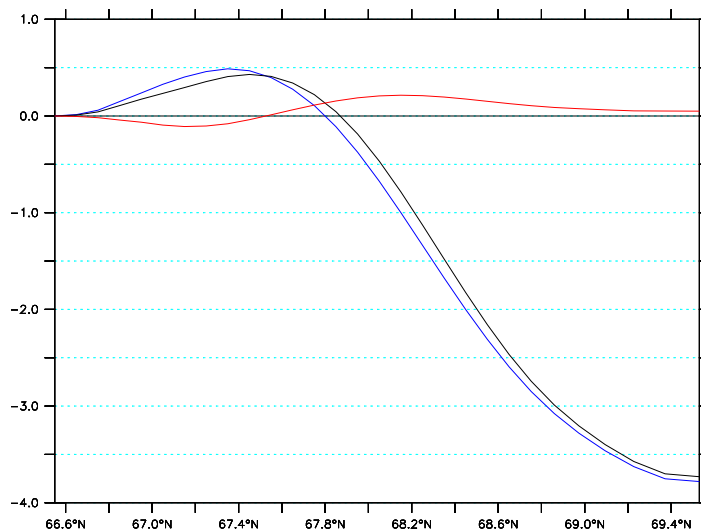
(c) Mismunur á (b) og (a)

Mynd 37: Straumur (cm/s) í austur-vesturstefnu á sniði við Hornbanka í keyrslu með daglegum og mánaðarlegum gögnum frá 1995. Staðsetning sniðsins sést á mynd 10. (a) Mánaðarmeðaltöl. (b) Dagsmeðaltöl. (c) Mismunur á straumi í keyrslu með daglegum og mánaðarlegum gögnum, (b)-(a).

hitafrávik benda til þess að hin eiginlega rangsælis hringrás komi sterkar fram í dagskeyrslunni. Aðstreymi kaldra sjógerða á Norðurmið og minna innstreymi Atlantssjávar með nyrðri grein Irmingerstraumsins veldur því að vestari grein hans styrkist og um leið rangsælis hringrás á Grænlandshafi.

Mynd 36 sýnir straum í norður-suðurstefnu á Faxaflóasníði. Straumsviðið er svipað í báðum keyrslum. Yfir landgrunnsbrúninni er straumur til suðurs og nær landi er veikari straumur til norðurs. Miðað við staðalkeyrsluna (mynd 12(a) á blaðsíðu 19) eru gildin í yfirborði í Irmingerstraumnum (straumur með jákvæð formerki milli 34°W og 29°W) lág og straumurinn er sterkastur á meira en 400 m dýpi. Þar er styrkurinn svipaður og í staðalkeyrslunni. Straumurinn yfir landgrunnsbrúninni til suðurs er sterkari þegar vindur tekur daglegum breytingum. Sést það á mismunasviði sem er sýnt á mynd 36(c).

Mismunur á straumi á Hornbanka er meiri en á Faxaflóa eins og sést á mynd 37. Það er greinilega minni straumur til austurs í dagskeyrslunni (mynd 37(b))

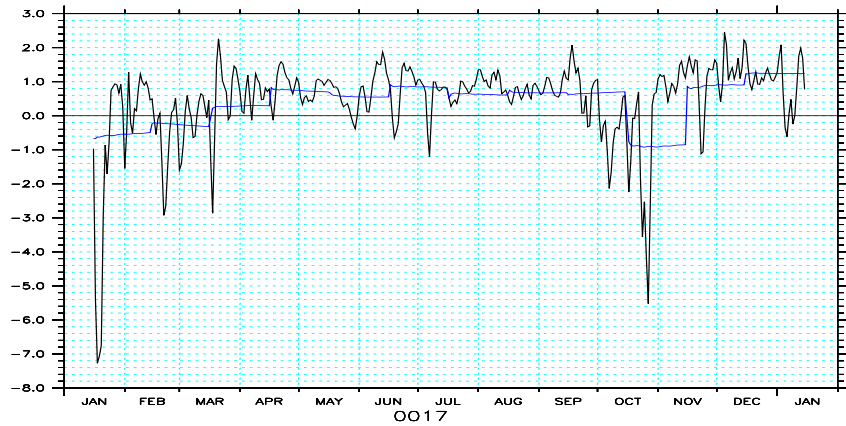


Mynd 38: Meðalársflæði Sv ($10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) á 0-500 m dýpi á sniðinu sem liggur á 23°W milli $66^\circ30'\text{N}$ og $69^\circ30'\text{N}$. Svartur litur: Keyrsla með þvingun sem byggir á dagsmeðaltölum. Blár: Keyrsla með þvingun sem byggir á mánaðarmedaltölum.

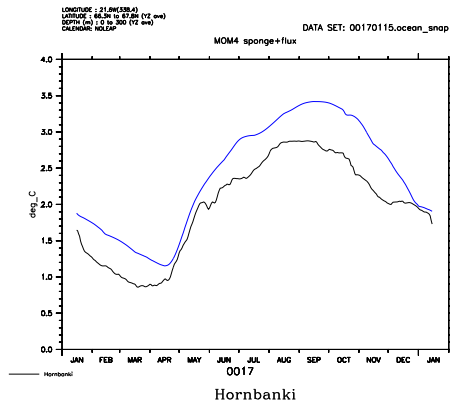
heldur en í mánaðarkeyrslunni (mynd 37(a)). Styrkur innstreymisins er svipaður í mánaðarkeyrslunni og í staðalkeyrslunni (mynd 13(a) á blaðsíðu 20), straumurinn er meira en 4 cm/s í kjarna innstreymisins en í dagskeyrslunni er hann milli 3 og 4 cm/s . Skilin milli straums til austurs og vesturs eru svipuð í dagskeyrslunni og í staðalkeyrslunni (þ.e. staðsetningin). Í mánaðarkeyrslunni eru skilin sunnar og það er meira streymi til vesturs nyrst á sniðinu en í staðalkeyrslunni.

Mynd 38 sýnir meðalársflæði í Sv ($10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) á 0-500 m dýpi á lengdargráðunni 23°W milli $66^\circ30'\text{N}$ (Kögur) og $68^\circ30'\text{N}$ (austurströnd Grænlands). Þetta snið sést á mynd 10 í kafla 3. Skilin milli nyrðri greinar Irmingerstraumsins (innflæði á Norðurmið) og Austur-Grænlandsstraumsins eru ekki á sama stað í keyrslunum. Massaflutningur til austurs fyrir sunnan 67.6°N er meiri í mánaðarkeyrslunni heldur en í daglegu keyrslunni en heildarflæði til austurs er þó svipað. Mesti massaflutningurinn er nyrst á sniðinu við austurströnd Grænlands. Flutningurinn til vesturs með Austur-Grænlandsstraumnum er meiri í keyrslu með mánaðarlegum gildum.

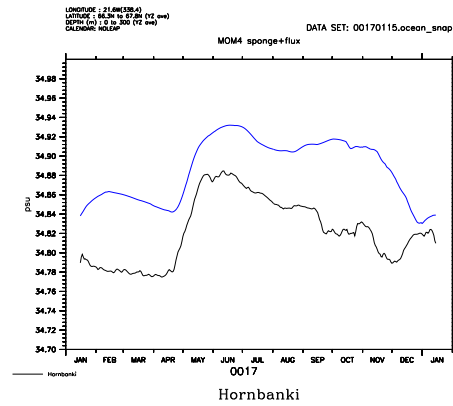
Mynd 39 sýnir heildarflæði í Sv á Hornbanka. Blái ferilinn sýnir flæði í mánaðarkeyrslunni og sá svarti flæði í dagskeyrslu. Ekki er sýnilegur munur á flæðinu á Hornbanka eftir því hvort dags- eða mánaðarmedaltöl eru notuð. Til að skera úr um hvort munur sé á innflæði Atlantssjávar í keyrslunum þarf að skoða hlutfall hans í flæðinu. Flæði á Hornbanka er fundið með því að heilda hraða í austur-



Mynd 39: Flæði í Sv ($10^6 \text{ m}^3/\text{s}$) á 0-300 m dýpi á Hornbankasniði. Svartur litur: Keyrsla með þvingun sem byggir á dagsmeðaltölum. Blár: Keyrsla með þvingun sem byggir á mánaðarmedaltölum.



(a) t ($^{\circ}\text{C}$)



(b) s (psu)

Mynd 40: Meðaltöl hita (a) og seltu (b) 0-300 m dýpi á Hornbankasniði. Meðaltalið er fundið út frá gildum á milli 66.3°N og 67.8°N . Svartur litur: Keyrsla með þvingun sem byggir á dagsmeðaltölum. Blár: Keyrsla með þvingun sem byggir á mánaðarmedaltölum.

vestur stefnu yfir $z=0-300\text{m}$ og $y=66.3-67.8^\circ\text{N}$. Þessi mörk voru ákveðin með tilliti til innstreymis sem sést á mynd 37 og hita- og seltugilda í staðalkeyrslunni sem sýnd eru á myndum 13(b) og 13(c) í kafla 3. Gert er ráð fyrir að innflæði Atlantssjávar sé að mestu innan þessa ramma. Mynd 40 sýnir hita og seltu á Hornbankasniði. Svarti ferilinn sýnir gildi þessara eðlisþátta í dagskeyrslunni og sá blái gildin í mánaðarkeyrslunni. Það er greinilegur munur á bæði sjávarhita og seltu í keyrslunum. Hlutfall Atlantssjávar ($t > 3^\circ\text{C}$, $s > 34.9$) er minna í dagskeyrslunni en í mánaðarkeyrslunni.

Myndir 42(a) til 42(d) á blaðsíðu 64 sýna hita og straum á mismunandi árstímum í dagskeyrslunni. Myndir 43(a) til 43(d) á blaðsíðu 65 sýna hita og straum á mismunandi árstímum í mánaðarkeyrslunni. Myndirnar er hægt að bera saman við myndir 41(a) til 41(d) á blaðsíðu 63. Þær sýna gildi úr leiðöngurum Hafrannsóknastofnunarinnar 1995. Til að glöggva sig á muninum á milli gilda í keyrslunum er mismunur hita og straums sýndur á myndum 44(a) til 44(d) á blaðsíðu 66. Í febrúar er sjávarhiti minni fyrir norðan landið í dagskeyrslunni en í mánaðarkeyrslunni. Gildin í báðum keyrslum eru þó hærri en brúunargildin. Gildin eru á bilinu $1-3^\circ\text{C}$ en brúunargildin eru á bilinu $0-1^\circ\text{C}$. Gildin eru þó minni en sjást í staðalkeyrslunni svo aðstreymi kaldra sjógerða er meira en þegar líkanið er þvingað með meðalárstíðasveiflu. Mynd 44(a) sýnir að aðstreymi kaldra sjógerða er meira í dagskeyrslunni. Á myndinni sem sýnir brúunargildin sést að innstreymið er farið að aukast í vorleiðangrinum en gildi milli $0-1^\circ\text{C}$ eru enn ríkjandi fyrir norðaustan landið. Á myndum sem sýna gildi í keyrslunum í maí sést greinileg aukning í innstreymi fyrir norðan Vestfirði. Hlý tunga teygir sig lengra í keyrslunum en brúunargildi gefa til kynna. Á myndum sem sýna hitamismun í keyrslunum kemur fram töluverður munur á hita í kjarna innstreymisins og er hiti lægri í dagskeyrslunni. Fyrir norðaustan landið er sjávarhiti nær því sem brúunargildin gefa til kynna og er hann minni í dagskeyrslunni.

6.4 Umræða

Sterkt norðlægt vindasvið við austurströnd Grænlands yfir Norður-Grænlands- og Íslandshafi veldur Ekman-flutningi upp að Grænlandsströnd. Hækkun á sjávarborði við ströndina skapar þrýstistraum (eðlisþyngdarstraum) meðfram austurströnd Grænlands. Þegar haffíkanið er þvingað með mánaðarmedaltölum eru aðstæður líkar því sem þarf að vera til að lausnir Ekmans á hreyfijöfnunum séu í gildi. Líkanið notar sama meðaltalsgildi vindpennu til að þvinga flæðið í heilan mánuð, sjá mynd 32. Vindasvið er því stöðugt yfir vetrarmánuðina. Þegar vindur blæs stöðugur meðfram strönd er hægt að sýna (Gill, 1982) að hæð sjávar við ströndina er í hlutfalli við tíma,

$$h = H + \eta = H + (\tau_s / \rho c) e^{-y/a} t$$

þar sem $c = \sqrt{gH}$ er fasahraði Kelvin-bylgju og $a = c/f$ er Rossby-radíus. X-ás liggur eftir ströndinni og y-ás liggur hornrétt á hana. η (hækkun sjávarborðs

við ströndina) er háð y (fjarlægð frá ströndu), τ_s (stærð vindspennunnar) og t (tíma). Á mynd 32(a) sjáum við að τ_s er á bilinu 0-2 N/m² þannig að nokkurra daga hvassviðrakafi hefur minni áhrif en meðalveður í heilan mánuð. Hækkun sjávarborðs veldur straumi samsíða ströndinni sem er í hlutfalli við η .

$$u_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

Því lengur sem vindurinn er stöðugur þeim mun meira hækkar sjávarborðið og massaflutningur með ströndinni verður meiri. Þetta skýrir meiri massaflutning með Austur-Grænlandsstaumnum, sjá mynd 38, þegar notuð er þvingun sem byggð er á mánaðarmedaltölum.

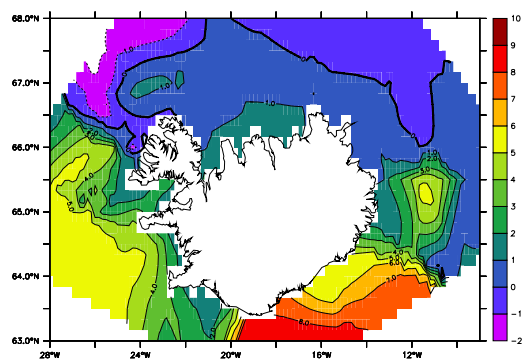
Það að hringrásin á Íslands- og Noregshafi sé veikari í dagskeyrslunni en í mánaðarkeyrslunni, er hægt að útskýra á sama hátt. Vegna stöðugra vindasviðs í mánaðarkeyrslunni er meiri Ekman-flutningur að ströndinni og það veldur því að sjávarborð er almennt lægra í mánaðarkeyrslunni en í dagskeyrslunni. Lækkun sjávarborðs yfir Norðurhöfum knýr rangsælis hringrás. Í líkaninu koma áhrif botnlögunar í ljós á þann hátt að tveir hringstraumar myndast. Annar er vestan við Jan Mayen-hrygginn og hinn austan megin við hann.

Norðan vindasvið við austurströnd Grænlands er sterkara í keyrslum þar sem flæðið er þvingað með gögnum frá 1995 heldur en í staðalkeyrslunni. Þetta veldur því að straumsvið sýnir sterkari Austur-Grænlandsstraum og sterkari hringstraum á bæði Íslands- og Noregshafi. Þegar flæðið er þvingað með dagsmedaltölum koma þessi einkenni ekki eins vel fram og þegar það er þvingað með mánaðarmedaltölum vegna þess að þvingunin er ekki eins stöðug með tíma.

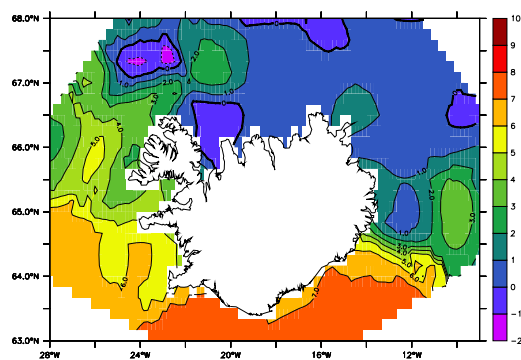
Í lok 5. kafla var rætt um áhrif mismunandi átta á flæði í gegnum og við Grænlandssund. Í N-átt er meiri straumur til suðurs meðfram Vestfjörðum heldur en í NA-átt. Myndir 32(a) og 32(b) á blaðsíðu 50 sýna stærð og stefnu vindspennu á stöð 6 á Látrabjargssniði. Svarti ferillinn sýnir stærð og stefnu eins og hún kemur fram í dagsmedaltölunum og sá blái sýnir hvernig stærð og stefna koma fram í mánaðarmedaltölunum. Í febrúar og mars er stefnan að meðaltali norðaustlæg. Á tímabilinu eru þrír hvassviðrakaffar þar sem styrkur daglegu gilda vindspennunnar er langtum meiri en meðaltalið. Þetta gerist 16.-19. janúar (N- eða NNA-átt), 19.-21. febrúar (NA-átt) og síðan 16.-17. mars (NNA-átt). Áhrif hvassviðrakaffanna eru greinileg á flæði á Hornbankasniði, sjá mynd 39. Þegar hvassviðrakaffarnir ganga yfir er mikið flæði til vesturs. Hámark í flæðinu er u.þ.b. degi eftir að veðrið er í hámarki. Mynd 40 sýnir að í febrúar til apríl er hlutfall Atlantssjávar í flæðinu minna í dagskeyrslunni en í mánaðarkeyrslunni. Með hliðsjón af niðurstöðum í kafla 5 gæti verið að hvössu NNA-áttirnar, sem hafa minna vægi í meðaltalinu, hafi þarna einhver áhrif.

Á mynd 44 sést að aðstreymi sval- og pólsjávar frá Íslandshafi er meira inn á Norðurmið í dagskeyrslunni en í mánaðarkeyrslunni. Í lok 5. kafla var rædd ósamhverfa sem verður til við samspil strauma og legu strandar á Grænlands-sundi. Við strönd Grænlands streymir sjórinn í sömu átt og vindurinn í NA- og SV-áttum. Þriggja daga samfelld SV-átt sem tekur við af þriggja daga samfelldri

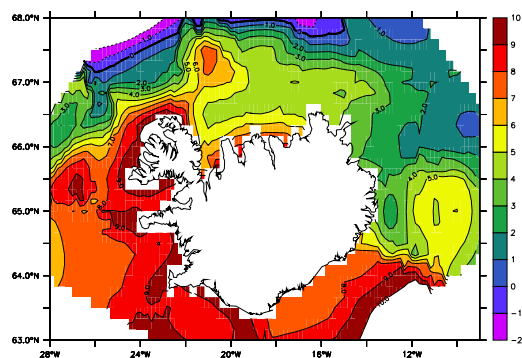
NA-átt veldur því að pólsjór berst til suðausturs. Meðalvindalagið er núll og ef það er notað er enginn flutningur. Fyrir tilstuðlan einhvers konar samspils sem hér hefur verið lýst getur pólsjór borist til austurs frá Grænlandsströnd og yfir á Íslandshaf í dagskeyrslunni þegar enginn flutningur er í mánaðarkeyrslunni.



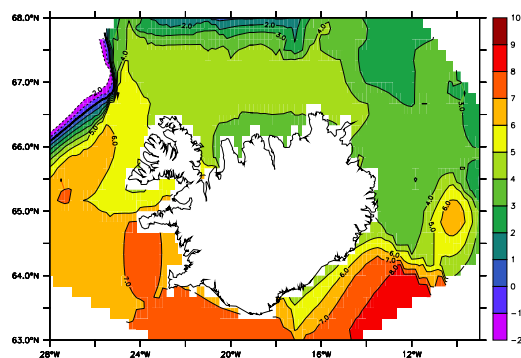
(a) Febrúar



(b) Maí

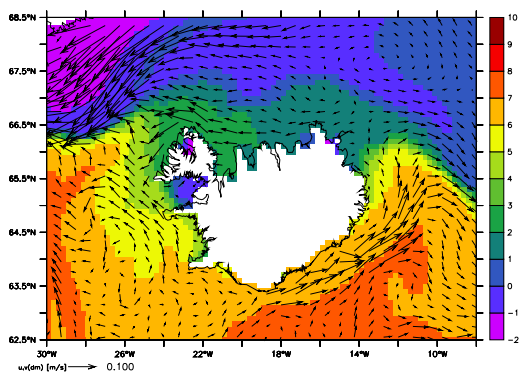


(c) Ágúst

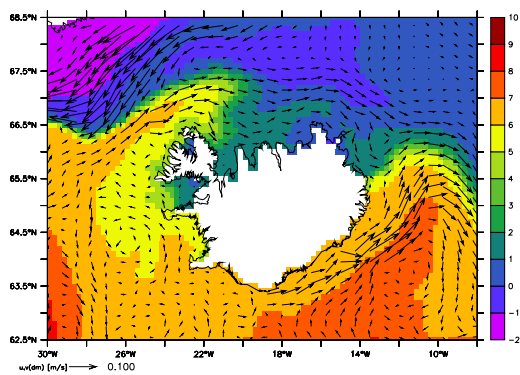


(d) Nóvember

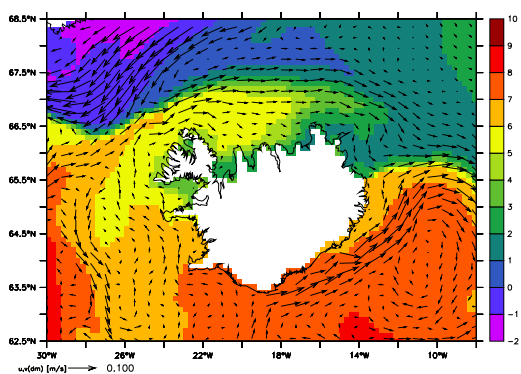
Mynd 41: Brúunargildi á 50 m dýpi úr leiðöngnum Hafrannsóknastonunarinnar árið 1995. (a) Vetrarleiðangur, (b) vorleiðangur, (c) sumarleiðangur og (d) haustleiðangur.



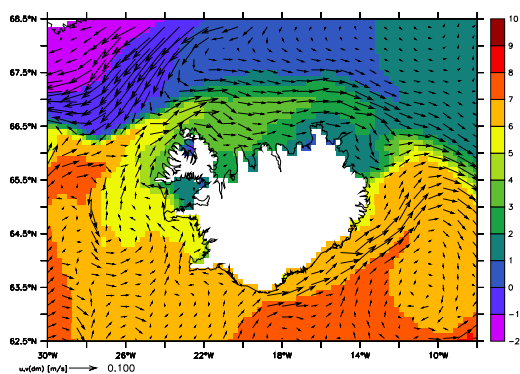
(a) Febrúar



(b) Maí

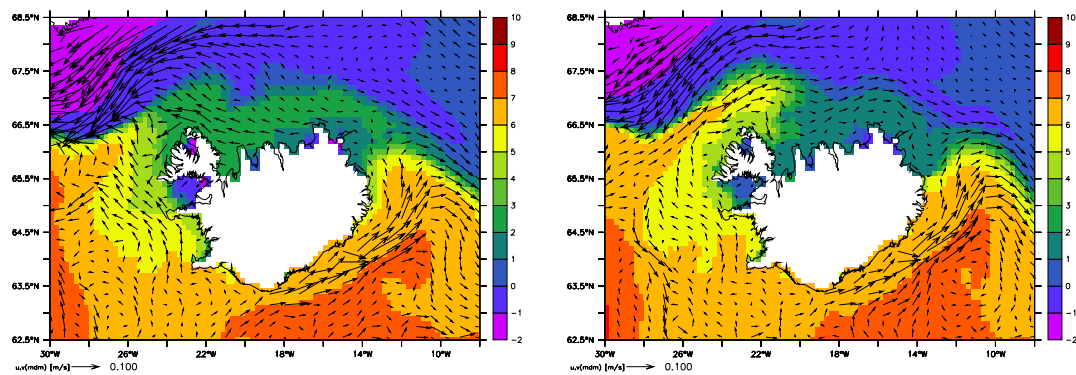


(c) Ágúst



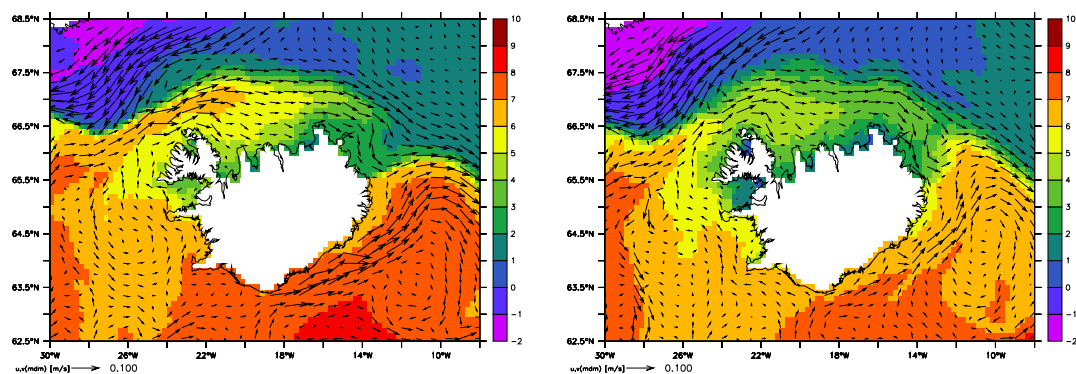
(d) Nóvember

Mynd 42: Niðurstöður úr keyrslu með dagsmeðaltölum: Hiti og straumur á 0-50 m dýpi. Mánaðarmeðaltal: (a) Febrúar, (b) maí, (c) ágúst og (d) nóvember. Örvarnar undir myndunum tákna vigra sem hafa stærðina 10 cm/s.



(a) Febrúar

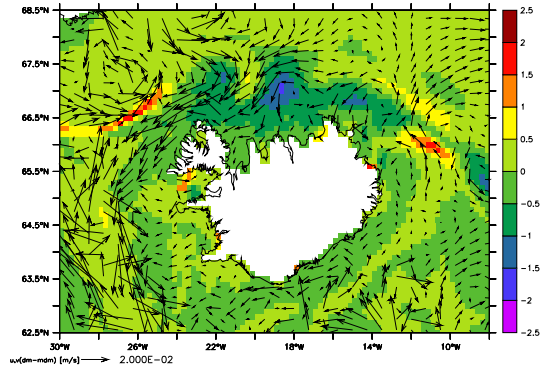
(b) Maí



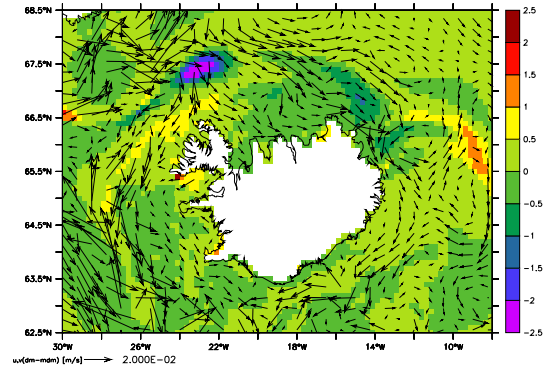
(c) Ágúst

(d) Nóvember

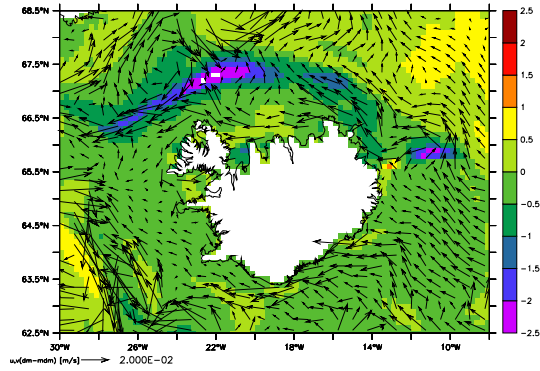
Mynd 43: Niðurstöður úr keyrslu með mánaðarmeðaltölum: Hiti og straumur á 0-50 m dýpi. Mánaðarmeðaltal: (a) Febrúar, (b) maí, (c) ágúst og (d) nóvember. Örvarnar undir myndunum tákna vigra sem hafa stærðina 10 cm/s.



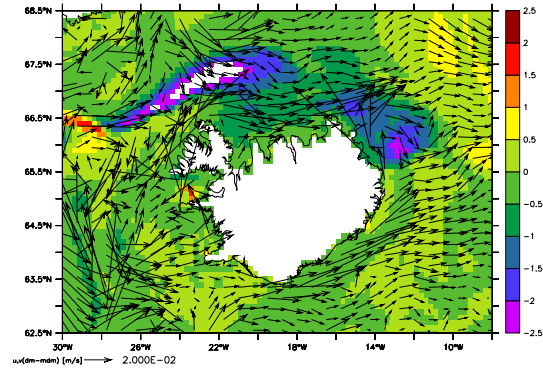
(a) Febrúar



(b) Maí



(c) Ágúst



(d) Nóvember

Mynd 44: Mismunasvið fyrir hita og straum á 0-50 m dýpi: Hiti og straumur í keyrslu með mánaðarmedaltölum er dregin frá hita og straumi í keyrslu með dagsmedaltölum. Mánaðarmedaltal: (a) Febrúar, (b) maí, (c) ágúst og (d) nóvember. Örvarnar undir myndunum tákna vigra sem hafa stærðina 2 cm/s.

7 Samantekt og lokaorð

Hafíkanið MOM4 er notað til að reikna strauma við Ísland með yfirborðsþvingun sem er fundin út frá meðaltali árána 1958-2002. Helstu straumar koma fram í líkaninu, sjá mynd 11, og eru Austur-Grænlandsstraumurinn og Norður-Atlantsskafsstraumurinn þeirra sterkastir. Austur-Íslandsstraumurinn er fremur veikur og hringrásin á Íslandshafi er það einnig. Áhrif botnlögunar á hringrásina koma fram í því að tveir hringstraumar eru til staðar: Annar er fyrir vestan Jan Mayen-hrygginn yfir Íslandshafi og hinn fyrir austan hrygginn yfir Noregshafi. Greinin sem ber hlýjan Atlantssjó upp að suðurströnd Íslands (sjá mynd 3 eftir Orvik og Niler (2002)) er of vestarlega og greinist fyrir sunnan Reykjaneshrygginn. Þar af leiðandi er flæði fyrir sunnan og vestan Ísland frábrugðið því sem sést á mynd 2 eftir Héðin og Svend-Aage (1999). Stærstur hluti Irmingerstraumsins streymir til norðurs fyrir vestan Reykjaneshrygginn og er lítill straumur til vesturs með suðurströndinni. Straumar til norðurs á landgrunninu fyrir vestan landið sjást á mynd 2. Við ströndina er straumur sem kemur fram í líkaninu en hann er fremur veikur. Við landgrunnsbrún er straumur til norðurs en í líkaninu kemur fram straumur til suðurs sem á upptök sín í Grænlandssundi þar sem nyrðri grein Irmingerstraumsins fer yfir Íslands-Grænlandshrygginn. Innstreymi Atlantssjávar á Norðurmið er norðar en mælingar Steingríms og Héðins (2005) hafa sýnt og er það að öllum líkindum afleiðing af því að fyrir vestan Ísland liggur Irmingerstraumurinn fyrir utan landgrunnsbrún. Straumaskilin austur af landinu eru norðar en á mynd þeirra Héðins og Svend-Aage. Staðsetning skilanna svo norðarlega getur annað hvort verið vegna þess að straumurinn meðfram suðausturströndinni til norðausturs er of sterkur eða vegna þess að Austur-Íslandsstraumurinn er of veikur. Árstíðabundinn breytileiki í sjávarhita og seltu kemur fram í líkaninu. Hann er ekki eins mikill og kemur fram í brúunargildum úr leiðöngrum Hafrannsóknastofnunarinnar frá sömu árstímum.

Þegar flæðið er þvingað með ferskvatnsrennsli af Íslandi kemur fram straumur sem er réttsælis umhverfis landið, sjá mynd 19. Fyrir vestan landið er straumurinn mestur við ströndina og við landgrunnsbrún. Fyrir norðan Vestfirði er straumurinn jafnari. Fyrir utan Faxaflóa eykst straumur til norðurs við ströndina úr að meðaltali 2-3 cm/s í 4-5 cm/s, þegar afrennsli er bætt við. Á Húnaflóa eykst straumur til austurs bæði í kjarna innstreymisins og nær landi. Afrennslisstraumurinn styrkir strandstrauminn sem sést á mynd 2. Vegna þessa verður meira innstreymi Atlantssjávar á Norðurmið og sjávarhiti fyrir norðan land hækkar miðað við það sem sést í staðalkeyrslunni. Straumurinn vegna afrennslisins hefur einnig áhrif á staðsetningu hitaskilanna austur af landinu. Í staðalkeyrslu án afrennslis eru skilin of norðarlega en vegna áhrifa frá strandstraumnum færast þau töluvert sunnar.

Í þeim punktum á Hornbanka- og Faxaflóasniði þar sem áhrif afrennslis eru mest var ekki hægt að finna árstíðabundinn breytileika í staumstyrk sem er tengdur árstíðasveiflu í afrennsli. Afrennslid hefur áhrif á árstíðasveiflu sjávarhita. Fyrir utan Faxaflóa er sjávarhiti í hámarki í ágúst. Þegar líkanið er keyrt með afrennsli

magnast árstíðasveiflan upp en hámarkið verður eftir sem áður í ágúst. Afrennslí lækkar eðlismassa sjávarins og stuðlar að stöðugra yfirborðslagi þannig að sumarihitun getur orðið meiri í yfirborðslaginu. Á Húnaflóa eru áhrifin flóknari. Hluta breytingar á árstíðasveiflu sjávarhita er hægt að útskýra með jafnri aukningu í straumstyrk yfir allt árið. Það veldur því að í kjarna innstreymisins er straumstyrkur fyrr í ákveðnu *vorgildi* og seinna í ákveðnu *haustgildi* miðað við keyrslu án afrennslis. Áhrif afrennslisins geta þannig verið þau að sjávarhiti hækkar fyrr á vorin og lækkar seinna á haustin.

Áhrif hvassviðrakafla voru athuguð sérstaklega með tilliti til innflæðis á Norðurlandi með Irmingerstraumnum. Unnsteinn Stefánsson (1962) fann samband milli tíðni norðanáttanna (N-, NA-, og NV-átta) í maí og ástands sjávar (hita og seltu) austur af Langanesi í ágúst. Þetta passaði vel við þær athuganir sem hann hafði gert á meðalstraumhraða milli norðvesturlands og norðausturlands. Ályktunin sem hann dró af þessu var að norðanáttir takmörkuðu innflæði Atlantssjávar fyrir norðan Vestfirði á vorin og það hefði áhrif á sjávarhita og seltu fyrir norðaustan landið á sumrin. Niðurstöður tilrauna með sterkum og stöðugum vindi eru þær að norðanáttir hafi takmarkandi áhrif á innflæði við Vestfirði en sunnanáttir hafi hvetjandi áhrif þar á. Það kemur í ljós að SV-átt er ekki eins hagstæð innflæðinu og S- og SA-átt. Einnig er NA-átt ekki eins óhagstæð og N- og NV-átt. Þetta er í samræmi við niðurstöður Unnsteins (1999) og Jóns Ólafssonar (1999) þar sem þeir finna tengsl milli mismunar á tíðni norðan- og sunnanátta yfir vetrarmánuðina og ástands sjávar fyrir norðan land að vori. Jón fann að auki að það var meiri fylgni milli mismunar á tíðni norðan- og norðvestanáttanna (N+NV) annars vegar og sunnan- og suðaustanáttanna (S+SA) hins vegar heldur en mismunarins (N+NA)-(S+SV) og er það í samræmi við niðurstöður í kafla 5. Fleira hefur áhrif á ástand sjávar fyrir norðan land sem gæti útskýrt niðurstöður Unnsteins og Jóns. Aðstreymi kaldra sjógerða norðan úr Íslandshafi er meira í NV-átt en NA-átt. Í SV-átt er straumur með norðurströndinni sem dreifir Atlantssjó austur með henni. Mikil tíðni SV-átta hefur því jákvæð áhrif á ástand sjávar til lengri tíma lítið fyrir norðaustan landið.

Styrkur Austur-Grænlandsstraumsins er meiri þegar flæðið er þvingað með vindgögnum frá 1995 en þegar það er þvingað með meðalárstíðasveiflu vinds. Það skýrist af því að norðanáttin er sterkari í vindasviði ársins 1995 heldur en í meðalárstíðasveiflunni. Hringstraumur á Íslands- og Noregshafi er einnig sterkari í keyrslu með mánaðargildum frá 1995 og það hefur áhrif á staðsetningu skilanna austur af landinu sem eru sunnar þegar vindasvið frá 1995 er notað.

Vindþvingun er stöðugri í keyrslu með mánaðarmedaltölum vindspennu heldur en í keyrslu með dagsmedaltölum vindspennu. Það veldur því að Ekmanflutningur að austurströnd Grænlands er meiri. Það orsakar bæði sterkari Austur-Grænlandsstaum og sterkari hringstraum yfir Íslands- og Noregshafi. Köld gildi fyrir norðan Ísland sem einkenna árið 1995 koma vel fram á myndum sem sýna brúunargildi úr mælingum Hafrannsóknastofnunarinnar sama ár. Aðstreymi kaldra sjógerða inn á Norðurlandi er meira þegar vindasvið tekur daglegum breytingum. Sjávarhiti við Norðurland í febrúar og maí er í báðum tilfellum lægri í dagskeyrsl-

unni en í mánaðarkeyrslunni og er nær þeim gildum sem sjást á myndunum. Hlutfall Atlantssjávar í flæði við Hornbanka er minna þegar um daglegan breytileika er að ræða og er hægt að álykta að innflæði Irmingerstraumsins sé minna en þegar um mánaðarlegan breytileika er að ræða. Hugsanlega er hægt að tengja það staðbundnum áhrifum mismunandi vindátta fyrir norðan og norðvestan landið. Það þarf þó að skoða nánar með keyrslum sem ná yfir lengri tímabil.

Heimildir

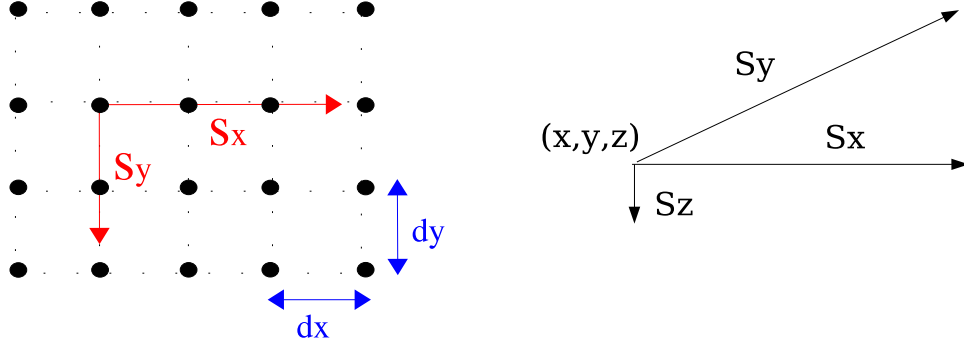
- Bretherton, F. P., Davis, R. E., og Fandry, C. B. (1976). „A technique for objective analysis and design of oceanographic experiments applied to MODE-73“. *Deep Sea Research*, 23:559 – 582.
- Coward, A. C. og de Cuevas, B. A. (2005). The OCCAM 66 level model: Model description, physics, initial conditions and external forcing. SOC Internal Report 99, Southampton Oceanographic Centre, Southampton, U. K.
- Einar Örn Ólason (2006). Oceanic circulation and variability around Iceland: A numerical study. Meistararitgerð við Háskóla Íslands. Júní 2006.
- Gill, A. E. (1982). *Atmosphere-Ocean Dynamics*, bindi 30 af *International Geophysics Series*. Academic Press. 662 s.
- Griffies, S., Harrison, M., Pacanowski, R., og Rosati, A. (2004). A Technical Guide to MOM4 - GFDL Ocean Group Technical Report. Skýrsla 5, NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. 339 s. Fáanlegt á: <http://www.gfdl.noaa.gov/fms>.
- Hafrannsóknastofnunin (1995). Þættir úr vistfræði sjávar 1995. Fjölrit 44, Hafrannsóknastofnunin. 34 s. Fáanlegt á: <http://www.hafro.is/Bokasafn/Timarit/fjolr.htm>.
- Hafrannsóknastofnunin (2006). Heimasíða Hafrannsóknastofnunarinnar: <http://www.hafro.is>. Febrúar 2005.
- Halldór Björnsson, Einar Örn Ólason, og Sæunn Halldórsdóttir (2006). Líkanreikningar á breytileika í hafi umhverfis Ísland. (Óbirt).
- Hansen, B. og Østerhus, S. (2000). „North Atlantic-Nordic Seas exchanges“. *Progress in Oceanography*, 45:109–2008.
- Hendry, R. og He, I. (1996). Technical Report on Objective Analysis (OA) Project. Skýrsla, Bedford Institute of Oceanography, Department of Fishery and Ocean. Maí 2004 (óbirt). Fáanlegt á: http://www.mar.dfo-mpo.gc.ca/science/ocean/coastal_hydrodynamics/Oax/oax.html.
- Hjálmar Vilhjálmsson (1997). „Climatic variations and some examples of their effects on the marine ecology of Icelandic and Greenland waters, in particular during the present century“. *Rit Fiskideildar*, 15(1):1–29.
- Héðinn Valdimarsson og Svend Aage Malmberg (1999). „Near surface circulation in Icelandic waters derived from satellite tracked drifters“. *Rit Fiskideildar*, 16:23–39.

- Jón Jónsson (1990). *Haffræðirannsóknir við Ísland II*. Bókaútgáfa Menningar-sjóðs, Reykjavík. 447 s.
- Jón Ólafsson (1985). Recruitment of Icelandic haddock and cod in relation to variability in the physical environment. ICES C.M. 1985/G59/Sess. Q Ref. C. 14 s.
- Jón Ólafsson (1999). „Connections between oceanic conditions off N-Iceland, Lake-Mývatn temperature, regional wind direction variability and the North Atlantic Oscillation“. *Rit Fiskideildar*, 16:41–57.
- Kristinn Einarsson (2004). Orkustofnun, Reykjavík. Munnlegar upplýsingar. Júní 2004 (óbirt).
- Mortensen, J. (2004). Satellite Altimetry and Circulation in the Danmark Strait and Adjacent Seas. Fjölrit 108, Hafrannsóknastofnunin. 84 s. Fáanlegt á: <http://www.hafro.is/Bokasafn/Timarit/fjolr.htm>.
- NOAA/OAR/ESRL PSD (1998). NODC_WOA98 data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at <http://www.cdc.noaa.gov/>.
- NOAA/OAR/ESRL PSD (2005). NCEP Reanalysis data provided by the NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, from their Web site at <http://www.cdc.noaa.gov/>.
- Orvik, K. A. og Niiler, P. (2002). „Major pathways of Atlantic water in the northern North Atlantic and Nordic Seas toward Arctic“. *Geophysical Research Letters*, 29(19). 1896, doi:10.1029/2002GL015002.
- Pacanowski, R. C. og Griffies, S. M. (2000). MOM 3.0 Manual. Skýrsla, NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. Netútgáfa: http://www.gfdl.noaa.gov/smg/MOM/web/guide_parent/guide_parent.html. September 2005.
- Pond, S. og Pickard, G. L. (1983). *Introductory Dynamical Oceanography*. Pergamon Press, 2. útgáfa. 329 s.
- Poulain, P.-M., Warn-Varnas, A., og Niiler, P. P. (1996). „Near-surface circulation of the Nordic seas as measured by Lagrangian drifters“. *Journal of Geophysical research*, 101(C8):18,237–18,258.
- Sigríður Sif Gylfadóttir (2002). Samanburður á brúunaraðferðum. Skýrsla 02016, Verðurstofa Íslands. 25 s. Fáanlegt á: <http://www.vedur.is/utgafa/greinargerdir/>.

- Steingrímur Jónsson og Héðinn Valdimarsson (2005). „The flow of Atlantic water to the North Icelandic Shelf and its relation to the drift of cod larvae“. *ICES Journal of Marine Science*, 62:1350–1359.
- Svend-Aage Malmberg (2003). „Haffræði og upphaf hafrannsóknna við Ísland“. *Náttúrufræðingurinn*, 71(3-4):88–97.
- Svend-Aage Malmberg og Héðinn Valdimarsson (2003). „Hydrographic conditions in Icelandic waters, 1990-1999“. *ICES Marine Science Symposia*, 219:50–60.
- Sæunn Halldórsdóttir, Halldór Björnsson, og Haraldur Ólafsson (2005). Netsetning mæligagna. Skýrsla 05009, Verðurstofa Íslands. 24 s. Fáanlegt á: <http://www.vedur.is/utgafa/greinargerdir/>.
- Trausti Jónsson (2002). Sveiflur I: Frumstæð athugun á dægursveiflu vindhraða og vindáttar í júnímánuði. Skýrsla 02030, Verðurstofa Íslands. 12 s. Fáanlegt á: <http://www.vedur.is/utgafa/greinargerdir/>.
- Unnsteinn Stefánsson (1962). „North Icelandic waters“. *Rit Fiskideildar*, 3:1–269.
- Unnsteinn Stefánsson (1991). *Haffræði I*. Háskólaútgáfan, Reykjavík. 413 s.
- Unnsteinn Stefánsson (1994). *Haffræði II*. Háskólaútgáfan, Reykjavík. 541 s.
- Unnsteinn Stefánsson (1999). *Hafið*. Háskólaútgáfan, Reykjavík. 430 s.
- Unnsteinn Stefánsson og Guðmundur Guðmundsson (1978). „The Freshwater Regime of Faxaflói, Southwest Iceland, and its Relationship to Meteorological Variables“. *Estuarine and Coastal Marine Science*, 6:535–551.
- Unnsteinn Stefánsson og Jón Ólafsson (1991). „Nutrients and fertility of Icelandic waters“. *Rit Fiskideildar*, 12(3):1–56.
- Uppala, S., Kallberg, P., Simmons, A., Andrae, U., da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M., Beljaars, A., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagemann, S., Holm, E., Hoskins, B., Isaksen, I., Janssen, P., Jenne, R., McNally, A., Mahfouf, J.-F., Morcrette, J.-J., Rayner, N., Saunders, R., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., og Woollen, J. (2005). „The ERA-40 re-analysis“. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131:2961–3012.
- Østerhus, S., Turrell, W. R., Jónsson, S., og Hansen, B. (2005). „Measured volume, heat, and salt fluxes from the Atlantic to the Arctic Mediterranean“. *Geophysical Research Letters*, 32. L07603, doi:10.1029/2004GL022188.

A Netsetning sjávarmælinga

Sjávarmælingar frá föstum sniðum Hafrannsóknastofnunarinnar eru ekki jafn dreifðar umhverfis landið. Til hagræðingar við ýmsa útreikninga er þörf á að færa mælingarnar yfir á reglulegt net. Þegar brúunarnet hefur verið ákveðið er gildi í hverjum netpunkti reiknað út frá nálægum mælingum.



Mynd 45: Punktar á reglulegu neti ásamt rúmskalanum (S_x, S_y, S_z)

A.1 Viðfangsgreining (*Objective analysis*)

Sú brúunaraðferð sem hér er notuð byggir á viðfangsgreiningu (*e. objective analysis*). Aðferðinni var lýst af Bretherton árið 1976 en hefur síðan verið notuð við brúun á veður- og sjávarmælingum. Gert er ráð fyrir að gildi í brúunarpunktum séu tengd með ákveðnum hætti sem hægt er að lýsa með tölfræðilegum aðferðum (Hendry og He, 1996).

Gildi í brúunarpunkti er reiknað sem vegið meðaltal af nálægum mælingum.

$$\theta'_x = \sum_{i=1}^N a_{xi} \phi_i \quad (27)$$

Mælingarnar ϕ_i samanstanda af raunverulegu gildi í punktinum auk skekkju, ϵ_i .

$$\phi_i = \theta(x)_i + \epsilon_i$$

Gera þarf ráð fyrir að skekkjurnar séu innbyrðis óháðar og óháðar mælingunum, einnig þarf staðalfrávik skekkjunnar, E , að vera þekkt.

$$\overline{\phi_k \epsilon_i} = 0 \quad (k, i = 1, \dots, N)$$

$$\overline{\epsilon_k \epsilon_i} = E \delta_{ki}$$

Ef meðaltal, $\overline{\theta_x}$, og samvikafall (*e. covariance function*), $F(\xi)$, sviðsins θ í punktinum x er þekkt

$$\begin{aligned}\overline{\theta_x} &= A \\ \overline{\theta_x \theta_{x+\xi}} &= F(\xi)\end{aligned}$$

þá er hægt að finna heppilegustu stuðlana a_i með því að lágmarka staðalskekkjuna (*e. error variance*)

$$\overline{(\theta_x - \theta'_x)^2}$$

sem er fall af stuðlunum a_i og samvikum (*e. covariance*) milli mæli- og brúunargilda sem eru reiknuð útfrá samvikafallinu. Val á samvikafalli er því mikilvægt en það er ákvarðað með því að meta tölfræðilega eiginleika gagnanna (Bretherton o.fl., 1976).

A.2 Brúunarforrit

Brúunarforritið Oax var þróað við Bedford Institute of Oceanography af Ian He, Ross Hendry og Gerry Boudreau. Það byggir á viðfangsgreiningu og er sérstaklega hannað til að brúa sjávarmælingar. Samvikafallið

$$F(r) = e^r \left(1 + r + \frac{r^2}{3} \right) \quad (28)$$

er innbyggt í forritið,

$$r = \sqrt{\left(\frac{x - x_i}{S_x}\right)^2 + \left(\frac{y - y_i}{S_y}\right)^2 + \left(\frac{z - x_i}{S_z}\right)^2} \quad (29)$$

er sköluð fjarlægð. Brúunargildi á netinu eru reiknuð útfrá meðaltali N næstu nágranna (*e. nearest neighbours*) með jöfnu 27. Mælingarnar eru valdar af svæði umhverfis brúunarpunktinn (x, y, z) sem afmarkast af S_x , S_y og S_z , sjá mynd 45. Forritið reiknar skekkju

$$\sqrt{(\theta_x - \theta'_x)^2} \quad (30)$$

fyrir hvern brúunarpunkt sem er háð staðsetningu mælinganna (x_i, y_i, z_i) , vali á samvikafalli og mæliskekkjunni E (Hendry og He, 1996).

Netsetningarpakkinn⁹ notar Oax til að brúa mæligögnin en samanstendur auk þess af forritum til að framkvæma einfalda reikninga á mæligögnunum og til að keyra Oax á auðveldan hátt. Forritin eru hönnuð sérstaklega til að brúa sjávarmælingar frá föstum sniðum Hafrannsóknastofnunarinnar. Brúunarnetið nær frá 63°N til 68°N og frá 28°W til 9°W og bil milli netpunkta er 10 breiddarmínútur og 10 lengdarmínútur (dx og dy á mynd 45). *Rúmskalinn* sem fjarlægðin er sköluð með (jafna 29) er skilgreindur með

$$S_z = 1 \text{ m}$$

⁹Netsetningarpakkinn var afrakstur verkefnisins Netsetning mæligagna, sjá <http://www.hi.is/~saeunh/netsetning>

$$S_x = S_0(1 + C_x\sqrt{s}) \quad (31)$$

$$S_y = S_0(1 + C_y\sqrt{s}) \quad (32)$$

þar sem $C_x = C_y = 2$ og $S_0 = 250$ km en með auðveldu viðmóti til að breyta C_x , C_y og S_0 . Gildi s fer eftir eftir botnlögun í brúunarpunkti og er því breytilegt milli brúunarpunkta, sjá nánar í Sæunn Halldórsdóttir o.fl. (2005). Með því að skilgreina rúmskalann er notandinn um leið að skilgreina það svæði sem forritið leitar að N nágrönnum punktsins.

B Vindspenna reiknuð í lofthjúpslíkani ECMWF

Vindspennan er reiknuð út frá vindgildum í lofthjúpslíkaninu samkvæmt eftirfarandi jöfnum.

$$\tau_x = \kappa \rho u_* Z^{-1} u \quad (33)$$

$$\tau_y = \kappa \rho u_* Z^{-1} v \quad (34)$$

Þar sem $\tau = (\tau_x, \tau_y)$ er vindspenna við yfirborð, $u = (u, v)$ er vindur í 10 m hæð og Z er gefið með jöfnu 35,

$$u_*^2 = \frac{1}{\rho} J_M$$

er viðnámshraði (*e. friction velocity*), ρ er eðlismassi,

$$J_M = \rho C_M |\mathbf{U}|$$

er skriðþungaflæði (*e. momentum flux*),

$$|\mathbf{U}|^2 = u^2 + v^2 + w_*^2$$

$$w_* = (z_i \frac{g}{T_l} Q_{0\nu})$$

Q er varmaflæði (*e. temperature flux*), κ er von Kármán fastinn, T_l er viðmiðunarhit, z_i er fasti,

$$C_M = \frac{\kappa^2}{z^2}$$

$$Z = \log\left(\frac{z_l + z_{0M}}{z_{0M}}\right) - \Psi_M\left(\frac{z_l + z_{0M}}{L}\right) + \Psi_M\left(\frac{z_{0M}}{L}\right) \quad (35)$$

z_l er hæð yfirborðslagsins í lofthjúpslíkaninu, Ψ er stöðugleikafall

$$Z_{0M} = \alpha_M \frac{\nu}{u_*} + \alpha_{C_h} \frac{u_*^2}{g}$$

er hrýfislengd (*e. roughness length*) og

$$L = -u_*^3 \left(\frac{\kappa g}{T_l} Q_{0\nu} \right)$$

er kennilengd Obukhov. Spennan τ í n -ta tímaskrefi er reiknuð út frá hraðanum í n - og $(n+1)$ -ta tímaskrefi.