



Kolgrafafjörður

Rannsókn á umhverfisaðstæðum og súrefnisbúskap við síldargöngur

Unnið fyrir Vegagerðina

Skýrsla nr. 15.11

Júlí 2015

Verkfræðistofan Vatnaskil

Síðumúli 28

108 Reykjavík

s. 568-1766

vatnaskil@vatnaskil.is

www.vatnaskil.is

Skýrsla nr: 15.11	Útgefið: Júlí 2015	Fjöldi síðna: 276	Dreifing: Opin <input checked="" type="checkbox"/> Lokuð <input type="checkbox"/>
-----------------------------	------------------------------	-----------------------------	---

Heiti skýrslu:

Kolgrafafjörður. Rannsókn á umhverfisaðstæðum og súrefnisbúskap við síldargöngur

Höfundar:

Gísli Steinn Pétursson, Sveinn Óli Pálmarsson, Helgi Gunnar Gunnarsson

Verkefnisstjóri:

Sveinn Óli Pálmarsson

Útdráttur:

Umfangsmikill síldardauði átti sér stað í Kolgrafafirði veturinn 2012-2013. Síldin drapst innan vegfyllingar Snæfellsnesvegur við Hjarðarbólsodda sem liggur við þröskuld innri fjarðar, og er talið að síldardauðinn hafi orsakast af súrefnisskortu. Í kjölfar þessara atburða kom Vegagerðin á fót rannsóknarverkefni til að varpa frekara ljósi á þá. Markmiðið var að greina umhverfisaðstæður í firðinum sem gætu haft áhrif á súrefnisbúskap fjarðarins þegar hann er undir miklu álagi vegna súrefnisupptöku síldar. Jafnframt, ef slíkar aðstæður skapast, að meta hvort tilkoma vegfyllingarinnar hefði áhrif á eða leiddi til þessara aðstæðna.

Gerð er ítarleg grein fyrir vettvangsmælingum sem voru framkvæmdar í samstarfi við Hafrannsóknastofnun, viðbótar gagnasöfnun, og gerð reiknilíkana sem notuð voru til stuðnings greiningar mæligagna, og til mats á áhrifum umhverfisaðstæðna og vegfyllingarinnar á súrefnisbúskap fjarðarins.

Helstu niðurstöður gefa til kynna að eftir vesturströnd Kolgrafafjarðar utan vegfyllingar sveiflast súrefnisstyrkur að mestu í takti við breytingar í súrefnisstyrk innan vegfyllingar þegar súrefnisupptaka er mikil í firðinum og endurnýjun súrefnis er lítil um yfirborð sjávar og með sjávarföllum. Þannig getur súrefnisstyrkur fallið á nokkuð stóru svæði í vesturhluta ytri fjarðar samhliða falli í innri firði, og samspil þessara svæða með vatnsskiptum um þröskuld innri fjarðar getur leitt til stigminkaðs súrefnisstyrks á báðum stöðum. Helstu þættir sem hafa áhrif á þetta samband eru vindstyrkur og varandi lágvindstímabila, og sveifla sjávarfalla með jafnan lægri styrk súrefnis þegar hún er lág. Mesta flóðhæð á stórstraumi ræður einnig miklu um hversu mikið súrefnishagur vænkast á þessu vestursvæði ytri fjarðar, og um leið í innri firði.

Vegfyllingin hefur engin áhrif á að súrefnisstyrkur í vesturhluta ytri fjarðar sveiflist í takti við breytingar í innri firði og að samspil svæðanna geti leitt til stigminkaðs súrefnisstyrks á báðum stöðum, öll einkenni eru þau sömu með og án vegfyllingar. Hins vegar getur staðsetning vatnsops við þröskuld innri fjarðar ráðið nokkru um hversu mikið súrefnisstyrkur fellur í innri firði við síldargöngur. Þannig veldur staðsetning brúarops vegfyllingarinnar vestarlega í firðinum virkari vatnsskiptum við vesturhluta ytri fjarðar. Súrefnisstyrkur getur þannig fallið aðeins meira að meðaltali innan vegfyllingar með vegfyllingu heldur en án hennar þegar síld gengur í miklum mæli í fjörðinn, vindhraði er lágur og sveifluhæð sjávarfalla er lág. Mismunurinn er þó stærðargráðu minni en fall súrefnisstyrks verður vegna síldarganganna.

Óvíst er hvort aðeins hærra meðalsúrefnisstyrkur í innri firði, án vegfyllingarinnar, hefði varnað því að 10% þeirrar síldar sem var á ferðinni drapst í desember 2012, þar sem tímasetning á miklum síldargöngum samfara óhentugum umhverfisaðstæðum virðist ráða mestu um hvort að til súrefnishnignunar geti komið í Kolgrafafirði. Magn síldar sem er á ferðinni ræður svo því hversu lágt súrefnisstyrkur fellur og hvort síldin hafi þá nægjanlegt súrefni og rými til að varna afföllum. Niðurstöður verkefnisins benda til þess að mun verri umhverfisaðstæður hafi skapast undanfarin ár en raunin varð í desember 2012. Má því teljast mildi að síldargöngur í jafn miklum mæli hafi ekki farið saman við svo óhagstæðar umhverfisaðstæður í Kolgrafafirði. Tilkoma vegfyllingarinnar breytir engu um það.

Verkkaupi:

Vegagerðin

Tengiliður verkkaupa:

Kristján Kristjánsson

Lykilorð:

Kolgrafafjörður, vettvangsmælingar, líkanreikningar, straumlíkan, vatnsgæðalíkan, Breiðafjörður, vatnsgæði, súrefnisstyrkur, súrefnisskortur, síldardauði, umhverfisaðstæður.

Efnisyfirlit

Efnisyfirlit	3
Myndaskrá	6
Töfluskrá	12
1. Inngangur	13
2. Forsaga og bakgrunnur rannsóknarverkefnisins	14
2.1. Síldargöngur og -dauði í Kolgrafafirði veturinn 2012-2013	14
2.2. Fiskdauði vegna umhverfisaðstæðna	15
2.3. Hugmyndir og hugrenningar í aðdraganda rannsóknarverkefnis um orsakir súrefnisskorts er olli síldardauða	16
3. Gögn	17
3.1. Veðurgögn	17
3.1.1. Veðurmælingar við Kolgrafafjörð	17
3.1.2. Veðurmælingar við Breiðafjörð	18
3.1.3. Veðurlíkansreikningar	18
3.2. Sjávarhæðargögn	19
3.2.1. Sjávarhæðarmælingar í Kolgrafafirði	19
3.2.2. Sjávarhæðarmælingar í Breiðafirði	19
3.2.3. Sjávarhæðarreikningar	19
3.3. Straumsjármælingar	19
3.4. Vatnsgæðamælingar	21
3.4.1. Yfirborðshiti sjávar	21
3.4.2. Hita-, seltu-, þrýstings- og súrefnismælingar í vatnsbolnum	21
3.4.3. Nettengdur súrefnismælir	23
3.4.4. Sýnatöku- og sondumælingar	23
3.5. Mat á magni síldar	24
3.5.1. Bergmálmælingar vegna lifandi síldar	24
3.5.2. Myndgreining vegna dauðrar síldar	24
3.6. Dýptarmælingar	25
4. Líkangerð	25
4.1. Einfaldir reikningar á meðalsúrefnisstyrk	25
4.2. Straumlíkan af Breiðafirði	26
4.2.1. Aðlögun straumlíkans	27
4.3. Vatnsgæðalíkan af Kolgrafafirði	29

4.3.1.	Straumhluti	29
4.3.2.	Vatnsgæðahluti	29
	Mat á bakgrunnssúrefnisupptöku	30
	Mat á súrefnisendurnýjun	30
	Mat á dreifingu og magni síldar	30
4.3.3.	Aðlögun vatnsgæðalíkans	31
5.	Umhverfisaðstæður og helstu áhrifavaldar óhagstæðra aðstæðna við síldargöngur	33
5.1.	Sjávarföll	33
5.2.	Sjávarstraumar	34
5.3.	Sjávarhiti	37
5.4.	Breytileiki súrefnisstyrks í innri firði	37
5.5.	Dreifing súrefnis í firðinum og flutningur um brúarop	39
5.6.	Áhrif sveiflu sjávarfalla og vindafars á lágsúrefnissvæði ytri fjarðar	40
5.7.	Áhrif vinds á súrefnisstyrk	40
6.	Umhverfisaðstæður í aðdraganda síldardauðaatburða	41
6.1.	Síldardauði í desember 2012	41
6.2.	Síldardauði í lok janúar 2013	42
7.	Algengi lágvindsaðstæðna í Kolgrafafirði að vetri	42
7.1.	Lággildi vetrarvinds með mismunandi varanda	42
7.2.	Tíðni og varandi lágvindstímabila að vetri	44
7.3.	Lágvindstímabil í skjóli austlægra vindátta	45
8.	Þáttur vegfyllingar við óhagstæðar umhverfisaðstæður við síldargöngur	46
8.1.	Straumhegðun með og án vegfyllingar	46
8.2.	Súrefnisstyrkur í innri firði	47
8.3.	Áhrif síldar, vinds og sjávarfalla	48
8.4.	Breytt súrefnisflæði milli innri og ytri fjarðar vegna stöðu sjávarfalla	49
8.5.	Umhverfisaðstæður í desember 2012	50
9.	Umræða vegna hugmynda um orsakabætti súrefnisskorts	51
10.	Möguleg greining á virkni mótvægisáðgerða	53
11.	Helstu niðurstöður	54
11.1.	Óhagstæðar umhverfisaðstæður í Kolgrafafirði við síldargöngur	54
11.2.	Alvarleiki umhverfisaðstæðna við liðna síldardauðaatburði og líkur á óhagstæðari aðstæðum	55
11.3.	Áhrif vegfyllingar á súrefnisskort í Kolgrafafirði	56
12.	Samantekt og niðurlag	56

Heimildir.....	59
Töflur.....	61
Myndir.....	67
Viðaukar.....	165

Myndaskrá

Mynd 1. Yfirlit gagna og mælitímabil. Línur tákna samfeldar mælingar en punktar tákna stakar mælingar (punktar í MicroCAT mælingum sýna hvenær mælarnir voru þjónustaðir).....	68
Mynd 2. Kolgrafafjörður, staðsetning mælistöðva.....	69
Mynd 3. Vindrósir fyrir veðurstöðvar í Kolgrafafirði fyrir mælitímabilið 20.7.2013 til 23.5.2015.....	70
Mynd 4. Reiknipunktur Harmonie veðurlíkansins, fyrir þau gögn sem afhent voru af Veðurstofu Íslands. Litaskalinn sýnir landhæð innan Harmonie frá meðalsjó (blátt) að tæplega 1100 m y.s. (rautt).	71
Mynd 5. Dýpi MicroCAT mælis á lögn HFS út frá mældum þrýstingi, hita og seltu (efra graf) fært yfir í hæð yfir meðalsjó (neðra graf).	72
Mynd 6. Niðurstöður ADCP straummælis á lögn HFS yfir tímabil þar sem færsla var á lögninni. Til viðmiðunar sýnir efsta graf vindhraða og –stefnu á Kolgrafafjarðarbrú, auk þess sem dýpi MC mælis á lögninni er sýndur á næstefsta grafi ásamt snúningi ADCP mælis um lóðréttan ás. Snúningur ADCP mælis um láréttan ás er á miðjugrafi og þau tvö neðstu sýna mældan straumhraða og –stefnu miðað við hæð yfir meðalsjó.	73
Mynd 7. Niðurstöður ADCP straummælis á lögn HFV yfir 10 daga tímabil 28. jan. 2014 til 7. feb. 2014. Til viðmiðunar sýnir efsta graf vindhraða og –stefnu á Kolgrafafjarðarbrú, auk þess sem dýpi MC mælis á lögninni er sýndur á næstefsta grafi ásamt snúningi ADCP mælis um lóðréttan ás. Snúningur ADCP mælis um láréttan ás er á miðjugrafi og þau tvö neðstu sýna mældan straumhraða og –stefnu miðað við hæð yfir meðalsjó.	74
Mynd 8. Niðurstöður ADCP straummælis á lögn HFA yfir 10 daga tímabil 28. jan. 2014 til 7. feb. 2014. Til viðmiðunar sýnir efsta graf vindhraða og –stefnu á Kolgrafafjarðarbrú, auk þess sem dýpi MC mælis á lögninni er sýndur á næstefsta grafi ásamt snúningi ADCP mælis um lóðréttan ás. Snúningur ADCP mælis um láréttan ás er á miðjugrafi og þau tvö neðstu sýna mældan straumhraða og –stefnu miðað við hæð yfir meðalsjó.	75
Mynd 9. Mælt dýpi MicroCAT mæla á L3.	76
Mynd 10. Nærmynd af dýptarmælingum MicroCAT mæla á L3, 4. til 7. des. 2013.	76
Mynd 11. Nærmynd af dýptarmælingum MicroCAT mæla á L3, 1. til 4. jan. 2014.	77
Mynd 12. Upphafleg staðsetning MicroCAT mælitækja og möguleg lokastaðsetning L3 eftir færslu.	77
Mynd 13. Mælt dýpi MicroCAT mæla á HSV.....	78
Mynd 14. Upphafleg staðsetning MicroCAT mælitækja og möguleg lokastaðsetning HSV.	78
Mynd 15. Mælt dýpi MicroCAT mæla á HFS.....	79
Mynd 16. Upphafleg staðsetning MicroCAT mælitækja og möguleg lokastaðsetning HFS.....	79

Mynd 17. Mælingar á L3e (efst), L3m (miðja) og L3n (neðst) frá 3.11.2013 – 31.12.2013.	80
Mynd 18. Sondumælingar 5.12.2013. Mældur súrefnisstyrkur (vinstri), staðsetning mælistaða (efri hægri) og sjávarstaða við mælingu (neðri hægri). Súrefnismæling fór ekki fram á fyrsta staðnum.....	81
Mynd 19. Sondumælingar 28.01.2014. Mældur súrefnisstyrkur (vinstri), staðsetning mælistaða (efri hægri) og sjávarstaða við mælingu (neðri hægri).	81
Mynd 20. Síldardreifing frá bergmálmælingu 12. desember 2012. Litakvarði sýnir hlutfallslegt magn síldar. Heildarmagn síldar var metið um 270 þús. tonn.	82
Mynd 21. Síldardreifing frá bergmálmælingu 12. mars 2013. Litakvarði sýnir hlutfallslegt magn síldar. Heildarmagn síldar var metið um 120 þús. tonn.	83
Mynd 22. Síldardreifing frá bergmálmælingu 28. nóvember 2013. Litakvarði sýnir hlutfallslegt magn síldar. Heildarmagn síldar var metið um 50 þús. tonn.	84
Mynd 23. Síldardreifing frá bergmálmælingu 11. janúar 2014. Litakvarði sýnir hlutfallslegt magn síldar. Heildarmagn síldar var metið um 60 þús. tonn.	85
Mynd 24. Síldardreifing frá bergmálmælingu 12. mars 2014. Litakvarði sýnir hlutfallslegt magn síldar. Heildarmagn síldar var metið um 85 þús. tonn.	86
Mynd 25. Dýptargrunnur straumlíkans. Litaskalinn nær frá 20 m y.s. (rautt) að 295 m dýpi (blátt).	87
Mynd 26. Dýpi í Kolgrafafirði. Á myndinni sjást m.a. þrengingar við mynni Kolgrafafjarðar.	88
Mynd 27. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar í mynni Kolgrafafjarðar vestan til (H1).	89
Mynd 28. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar í mynni Kolgrafafjarðar austan til (H2).	89
Mynd 29. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar utan vegfyllingar í Kolgrafafirði við vestur strönd (H3).	90
Mynd 30. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar innan vegfyllingar í Kolgrafafirði við Eiðisstapa (H4).	90
Mynd 31. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar í tíðnirófi fyrir 12 daga tímaröð við mynni Kolgrafafjarðar vestan til (H1). Tíðnir helstu sjávarfallapátta hafa verið merktar inn á myndina.	91
Mynd 32. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar í tíðnirófi fyrir 12 daga tímaröð við mynni Kolgrafafjarðar austan til (H2). Tíðnir helstu sjávarfallapátta hafa verið merktar inn á myndina.	91
Mynd 33. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar í tíðnirófi fyrir 12 daga tímaröð utan vegfyllingar í Kolgrafafirði við vestur strönd (H3). Tíðnir helstu sjávarfallapátta hafa verið merktar inn á myndina.	92
Mynd 34. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar í tíðnirófi fyrir 12 daga tímaröð innan vegfyllingar í Kolgrafafirði við Eiðisstapa (H4). Tíðnir helstu sjávarfallapátta hafa verið merktar inn á myndina.	92
Mynd 35. Samanburður reiknaðra og mældra straumhraðapátta fyrir HFS. Straumhraði mældur á hverju dýptarbili fyrir sig er sýndur í gráskala litum í bakgrunni myndanna.....	93

Mynd 36. Samanburður reiknaðra og mældra straumhraðapátta fyrir HNA. Straumhraði mældur á hverju dýptarbili fyrir sig er sýndur í gráskala litum í bakgrunni myndanna.....	93
Mynd 37. Samanburður reiknaðra og mældra straumhraðapátta fyrir HSV. Straumhraði mældur á hverju dýptarbili fyrir sig er sýndur í gráskala litum í bakgrunni myndanna.....	94
Mynd 38. Samanburður reiknaðra og mældra straumhraðapátta fyrir HFA. Straumhraði mældur á hverju dýptarbili fyrir sig er sýndur í gráskala litum í bakgrunni myndanna.....	94
Mynd 39. Samanburður reiknaðra og mældra straumhraðapátta fyrir HFV. Straumhraði mældur á hverju dýptarbili fyrir sig er sýndur í gráskala litum í bakgrunni myndanna.....	95
Mynd 40. Næmnigreining á staðsetningu reiknaðra strauma fyrir HNA.	95
Mynd 41. Straumar í Kolgrafafirði. Mæld gildi eru táknuð með rauðum örvum en reiknuð gildi með svörtum. Lengd straumörva fylgir kvaðratrót hraðans sem örvarnar sýna og er því ekki línulegt samband milli hraða og lengd örva.	96
Mynd 42. Samanburður á bakgrunnssúrefnisupptöku. Föst bakgrunnsupptaka 1,8 g O ₂ /m ² /d er borin saman við breytilega bakgrunnsupptöku (SOD) þar sem 1,8 g O ₂ /m ² /d er innan vegfyllingar en 1,0 g O ₂ /m ² /d utan hennar. Dagar í október 2013.....	97
Mynd 43. Svæði sem sýna hvar síld var dreift í líkani innan og utan vegfyllingar í Kolgrafafirði. Síld hvers svæðis var dreift jafnt yfir rúmmál svæðisins.	98
Mynd 44. Áætlað mat síldarmagns utan og innan vegfyllingar sem og heildarmagn innan Kolgrafafjarðar.	99
Mynd 45. Samanburður reiknaðrar sjávarhæðar frá straumlíkani og straumhluta vatnsgæðalíkans við H4.	99
Mynd 46. Samanburður reiknaðra strauma frá straumhluta vatnsgæðalíkans og straumlíkani á útfalli.	100
Mynd 47. Samanburður reiknaðra strauma frá straumhluta vatnsgæðalíkans og straumlíkani á liggjanda á fjöru.	101
Mynd 48. Samanburður reiknaðra strauma frá straumhluta vatnsgæðalíkans og straumlíkani á aðfalli.	102
Mynd 49. Samanburður reiknaðra strauma frá straumhluta vatnsgæðalíkans og straumlíkani á liggjanda á flóði.....	103
Mynd 50. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar innan vegfyllingar í Kolgrafafirði við Eiðisstapa (H4) fyrir straumhluta vatnsgæðalíkansins.....	104
Mynd 51. Samanburður reiknaðs og mælds súrefnisstyrks, 12 klst meðaltöl, á L1, L2 og L3 fyrir breytilegt magn síldar í Kolgrafafirði (heildarmagn í Kolgrafafirði er sýnt). L3 færðist á mælitímabilinu og eru því sýndar reiknaðar niðurstöður fyrir upphafsstaðsetningu og áætlaða lokastaðsetningu.....	105
Mynd 52. Samanburður reiknaðs og mælds súrefnisstyrks, 12 klst, meðaltöl, á HNA, HSV, HFA og HFV.....	106
Mynd 53. Aflróf sjávarhæðarmælinga í Ólafsvík (Ó), við mynni Kolgrafafjarðar (H1) og í innri Kolgrafafirði (H4). Helstu þættir sjávarfalla eru sýndir til samanburðar á tilsvareandi tíðnum.	107
Mynd 54. Greina má fasamun í sjávarföllum milli stöðva í Kolgrafafirði. Mestur munur er milli H1 og H4.	108

Mynd 55. Afhróf meðalstraumhraða yfir dýpi á HNA brotið upp í snúningsþætti.	109
Mynd 56. Afhróf meðalstraumhraða yfir dýpi á HFS brotið upp í snúningsþætti.....	110
Mynd 57. Afhróf meðalstraumhraða yfir dýpi á HSV brotið upp í snúningsþætti.	111
Mynd 58. Afhróf meðalstraumhraða yfir dýpi á HFV brotið upp í snúningsþætti.	112
Mynd 59. Afhróf meðalstraumhraða yfir dýpi á HFA brotið upp í snúningsþætti.	113
Mynd 60. Afhróf meðalstraumhraða yfir dýpi frá öllum straumsjármælistöðum.	114
Mynd 61. Reiknaðar straumörvar á útfalli lagðar ofan á dýpi Kolgrafafjarðar.	115
Mynd 62. Reiknaðar straumörvar á liggjanda á fjöru lagðar ofan á dýpi Kolgrafafjarðar.	116
Mynd 63. Reiknaðar straumörvar á aðfalli lagðar ofan á dýpi Kolgrafafjarðar.	117
Mynd 64. Reiknaðar straumörvar á liggjanda á flóði lagðar ofan á dýpi Kolgrafafjarðar.	118
Mynd 65. Dagleg meðaltöl mælds yfirborðshita í Kolgrafafirði.	119
Mynd 66. Mælt hitastig sjávar á völdum stöðum.	120
Mynd 67. Afhróf mælds súrefnis frá MicroCAT á straumsjárlögnum.	121
Mynd 68. Tímaraðgreining mælds súrefnisstyrks á L3e, lágheypisíun.	122
Mynd 69. Súrefnisstyrkur á L3n, lágheypi- og háheypisíun (efri). Mæld sjávarhæð í H4 (neðri).	122
Mynd 70. Samanburður á mældum súrefnisstyrk mælitækja L1, L2 og L3.	123
Mynd 71. Samanburður á lágheypisíuðum mælingum úr MicroCAT mælitækjum.	124
Mynd 72. Reiknaður súrefnisstyrkur á smástraumi nærri mældu laggildi á rannsóknartímabili, á útfalli.	125
Mynd 73. Reiknaður súrefnisstyrkur á smástraumi nærri mældu laggildi á rannsóknartímabili, á liggjanda á fjöru.	126
Mynd 74. Reiknaður súrefnisstyrkur á smástraumi nærri mældu laggildi á rannsóknartímabili, á aðfalli.	127
Mynd 75. Reiknaður súrefnisstyrkur á smástraumi nærri mældu laggildi á rannsóknartímabili, á liggjanda á flóði.	128
Mynd 76. Reiknaður súrefnisstyrkur á aðfalli á stórstraumi með tiltölulega stóru lágsúrefnissvæði í ytri firði.	129
Mynd 77. Reiknaður súrefnisstyrkur á stórstraumi með mun minna lágsúrefnissvæði utan vegfyllingar.	130
Mynd 78. Reiknaður meðalsúrefnisstyrkur (dökkblá lína) innan vegfyllingar Kolgrafafjarðar (svæði afmarkað á korti með svartri línu) ásamt reiknuðum styrk í þremur punktum. Einnig er sýndur mældur vindhraði (5 daga lágheypisíun), vindstefna (24 klst meðaltal) og sjávarhæð innan vegfyllingar.	131
Mynd 79. Samanburður reiknaðs súrefnisstyrks á völdum stöðum utan og innan vegfyllingar í Kolgrafafirði (efri). Áætlað magn síldar í líkani út frá aðlögun vatnsgæðalíkans (neðri).	132
Mynd 80. Veðurstöð í botni Kolgrafafjarðar. Mæld vindátt (efri) og vindhraði (neðri). Júlí 2013 – apríl 2014.	133
Mynd 81. Veðurstöð á brúnni í Kolgrafafirði. Mæld vindátt (efri) og vindhraði (neðri). Júlí 2013 – apríl 2014.	134
Mynd 82. Veðurstöð við Eiði í Kolgrafafirði. Mæld vindátt (efri) og vindhraði (neðri). Júlí 2013 – apríl 2014.	135

Mynd 83. Veðurstöð við Kolgrafir. Mæld vindátt (efri) og vindhraði (neðri). Júlí 2013 – apríl 2014.	136
Mynd 84. Lághleypisíaðar (28 klst) súrefnismælingar úr MicroCAT (gráu línur) og lághleypisíaðar (10 daga) vindmælingar í Kolgrafafirði. Júlí 2013 – nóvember 2013.....	137
Mynd 85. Lághleypisíaðar (28 klst) súrefnismælingar úr MicroCAT (gráu línur) og lághleypisíaðar (10 daga) vindmælingar í Kolgrafafirði. Desember 2013 – apríl 2014.....	138
Mynd 86. Veðurstöð á brúnni í Kolgrafafirði. Mæld vindátt (efri) og vindhraði (neðri). Vetur 2012-2013.	139
Mynd 87. Áætluð sjávarhæð í innri firði fyrir nóvember 2012 til loka febrúar 2013, frá hnattræna sjávarfallalíkaninu TPXO.	140
Mynd 88. Mældur vindhraði á Kolgrafafjarðarbrú vetur 2012-2013 þegar síldardauði varð. Sýndar er 10 mínútna mælingar, eins dags lághleypisíaðar mælingar (1dLH) og meðaltöl (MT) um 20 daga samfelldra tímabila í aðdraganda síldardauðanna. Rauðar punktalínur marka þá daga þegar síldardauða varð vart, græn punktalína markar tímamark í aðdraganda seinni atburðar sem hefur sams konar vindafarstímabil að baki og þegar fyrri atburðurinn varð.	141
Mynd 89. Meðaltal vindhraða á brú, yfir 5, 10 og 20 daga, með viðmiðunartímabil nóvember til og með febrúar skyggt með gráum lit. Merking árs á x-ás miðar við byrjun árs, 1. janúar.....	142
Mynd 90. Meðaltal vindhraða á brú, yfir 2, 3, 4, 5, 10 og 20 daga, með viðmiðunartímabil nóvember til og með febrúar skyggt með gráum lit. Júlí 2005 – júlí 2006, og júlí 2006 – júlí 2007.	143
Mynd 91. Meðaltal vindhraða á brú, yfir 2, 3, 4, 5, 10 og 20 daga, með viðmiðunartímabil nóvember til og með febrúar skyggt með gráum lit. Júlí 2007 – júlí 2008, og júlí 2008 – júlí 2009.	144
Mynd 92. Meðaltal vindhraða á brú, yfir 2, 3, 4, 5, 10 og 20 daga, með viðmiðunartímabil nóvember til og með febrúar skyggt með gráum lit. Júlí 2009 – júlí 2010, og júlí 2010 – júlí 2011.	145
Mynd 93. Meðaltal vindhraða á brú, yfir 2, 3, 4, 5, 10 og 20 daga, með viðmiðunartímabil nóvember til og með febrúar skyggt með gráum lit. Júlí 2011 – júlí 2012, og júlí 2012 – júlí 2013.	146
Mynd 94. Meðaltal vindhraða á brú, yfir 2, 3, 4, 5, 10 og 20 daga, með viðmiðunartímabil nóvember til og með febrúar skyggt með gráum lit. Júlí 2013 – júlí 2014, og júlí 2014 – júlí 2015.	147
Mynd 95. Lágildir vetrarvinds hvers vetrar 2005/2006 til 2014/2015 yfir meðalöl 2, 3, 4, 5, 10 og 20 daga brúað á meðaltalstímabil og fært á hlutfallsgrunn þar sem fjöldi lággilda jafnt eða minna en viðmiðunargildi.	148
Mynd 96. Reiknaður meðalsúrefnisflutningshraði yfir tímabilið nóvember til og með febrúar, fyrir 10 ára tímabil veðurraðar á Kolgrafafjarðarbrú, og yfir meðaltalstímabil 2 til 40 daga í aðdraganda hvers viðmiðunardags. Reiknuð gildi þriggja viðmiðunardaga eru sérstaklega dregin fram með mismunandi litum punktum.	149
Mynd 97. Vindhraði frá Harmonie veðurlíkaninu þann 27. janúar 2014 kl 13:00.	150
Mynd 98. Vindhraði frá Harmonie veðurlíkaninu þann 8. febrúar 2014 kl 23:00.	151
Mynd 99. Reiknað rennsli yfir þröskuld Kolgrafafjarðar með og án vegfyllingar.	152

Mynd 100. Reiknaður meðalsúrefnisstyrkur með og án vegfyllingar innan vegstæðis (svæði afmarkað á korti með svartri línu) ásamt vindhraða (5 daga lánleypisíun), -stefnu (24 klst meðaltal) og sjávarföllum innan vegfyllingar.	153
Mynd 101. Samanburður reiknaðs súrefnisstyrks með og án vegfyllingar þegar meðalsúrefnisstyrkur í innri firði er heldur lægri með tilkomu vegfyllingar.....	154
Mynd 102. Samanburður reiknaðs súrefnisstyrks með og án vegfyllingar þegar óverulegur munur er á meðalsúrefnisstyrk í innri firði.	155
Mynd 103. Reiknaður meðalsúrefnisstyrkur með og án vegfyllingar innan vegstæðis fyrir mismunandi mikið fast álag vegna síldar ásamt vindhraða (5 daga lánleypisíun), -stefnu (24 klst meðaltal) og sjávarföllum innan vegfyllingar.....	156
Mynd 104. Reiknaður meðalsúrefnisstyrkur með og án vegfyllingar innan vegstæðis með mismunandi vindáhrifum ásamt mældum vindhraða (5 daga lánleypisíun), -stefnu (24 klst meðaltal) og sjávarföllum innan vegfyllingar. Álag allra tilvika er fast í tíma og eru 25 þúsund tonn af síld innan vegfyllingar.....	157
Mynd 105. Reiknaður meðalsúrefnisstyrkur með og án vegfyllingar innan vegstæðis, síld dreift um norðursvæði innri fjarðar samanborið við grundreifingu skv. aðlögun líkans, ásamt mældum vindhraða (5 daga lánleypisíun), -stefnu (24 klst meðaltöl) og sjávarföllum innan vegfyllingar.	158
Mynd 106. Reiknaður súrefnisstyrkur í völdum punktum i innri og ytri firði, með og án vegfyllingar (efra), og reiknaður meðalsúrefnisstyrkur, 12 klst meðaltöl, í innri firði með og án vegfyllingar (neðri).....	159
Mynd 107. Reiknaðar straumörvar lagðar ofan á reiknaðan súrefnisstyrk, með og án vegfyllingar, undir lok útfalls 20. janúar 2014, kl. 15.....	160
Mynd 108. Reiknaðar straumörvar lagðar ofan á reiknaðan súrefnisstyrk, með og án vegfyllingar, undir lok aðfalls 20. janúar 2014, kl. 20.	161
Mynd 109. Reiknaðar straumörvar lagðar ofan á reiknaðan súrefnisstyrk, með og án vegfyllingar, undir lok útfalls 1. febrúar 2014, kl. 13.	162
Mynd 110. Reiknaðar straumörvar lagðar ofan á reiknaðan súrefnisstyrk, með og án vegfyllingar, undir lok aðfalls 1. febrúar 2014, kl. 19.	163
Mynd 111. Reiknaður meðalsúrefnisstyrkur með og án vegfyllingar innan vegstæðis yfir tímabil síldardauðans í desember 2012 ásamt mældum vindhraða (5 daga lánleypisíun), -stefnu (24 klst meðaltöl) og sjávarföllum innan vegfyllingar.....	164

Töfluskrá

Tafla 1. Veðurstöðvar í Kolgrafafirði.	62
Tafla 2. Sjávarhæðarmælar í Kolgrafafirði.	62
Tafla 3. Yfirborðshitamælar í Kolgrafafirði.....	62
Tafla 4. Straumsjármælar í Kolgrafafirði.	62
Tafla 5. MicroCAT síritamælar og nettengdur súrefnismælir.	63
Tafla 6. Veðurstöðvar í Breiðafirði.	64
Tafla 7. Lægsti meðalvindstyrkur (lágmark) hvers vetrar 2005/2006 til 2014/2015 yfir mismunandi meðaltalstímabil, raðaður í vaxandi röð.....	65

1. Inngangur

Síldargöngur hafa verið tíðar á liðnum árum í sunnanverðum Breiðafirði og hefur síldin m.a. leitað inn í Kolgrafafjörð á norðanverðu Snæfellsnesi, austan Grundarfjarðar. Í kjölfar umfangsmikils síldardauða í Kolgrafafirði veturinn 2012-2013 sem talinn er tilkominn vegna súrefnisskorts, kom Vegagerðin á fót rannsóknarverkefni til að varpa ljósi á þessa atburði og hvort tilkoma vegfyllingar Snæfellsnesvegjar við Hjarðarbólsodda hafi ráðið einhverju um. Vatnaskil hafa verið ráðgjafi Vegagerðarinnar við skilgreiningu og framkvæmd rannsóknarverkefnisins. Framkvæmdar voru vettvangsmælingar í samstarfi við Hafrannsóknastofnun og líkangerð farið fram til stuðnings greininga á mæligögnum og til að leggja mat á áhrif vegfyllingarinnar á súrefnisbúskap fjarðarins.

Síldardauðinn í Kolgrafafirði átti sér stað í tveimur aðskildum atburðum með um eins og hálfsmánaðar millibili. Í hvorum atburði hefur verið áætlað að nærri 10% af þeirri síld sem var á ferðinni um fjörðinn hafi drepist, eða um 30 þúsund tonn í þeim fyrri og um 22 þúsund tonn í þeim síðari. Álíka mikið magn síldar, eða um 200-250 þúsund tonn, var talið hafa verið á ferðinni um fjörðinn milli atburðanna auk þess sem eldri mælingar Hafrannsóknastofnunar höfðu gefið til kynna þetta miklar síldargöngur í Kolgrafafirði án þess að til fiskidauða hafi komið. Því var ekki hægt að útiloka að umhverfisaðstæður hefðu ráðið einhverju um súrefnisskortinn og dauða síldarinnar í atburðunum tveimur. Rannsóknarverkefninu var því ætlað að greina mögulegar umhverfisaðstæður í firðinum og hvernig þær gætu haft áhrif á súrefnisbúskap fjarðarins þegar hann er undir miklu álagi vegna súrefnisupptöku síldar. Jafnframt, ef slíkar aðstæður skapast, að leggja mat á hvort tilkoma vegfyllingarinnar hefði áhrif á eða leiddi til þessara aðstæðna.

Sem leiðir að þessum markmiðum rannsóknarverkefnisins voru greindar þær tilgátur um áhrifaþætti súrefnisskorts sem fram komu í kjölfar síldardauðans og mið af því tekið við uppsetningu og framkvæmd vettvangsmælinga og gagnvart líkangerð. Líkangerðin hefur þróast enn frekar til að styðja við greiningu mælinganna jafnframt því sem mat á mögulegum áhrifum vegfyllingarinnar á súrefnisbúskap fjarðarins byggir á líkangerðinni, auk þess sem hún treystir mat á hvers konar mótvægisáðgerðum til handa bættum súrefnishag í firðinum.

Í eftirfarandi útlistun er gerð nánari grein fyrir forsögu málsins og þeim hugmyndum sem fram komu á fyrri stigum um mögulega áhrifaþætti síldardauðans, sem síðan lágu til grundvallar tilhögun rannsóknanna. Þá er gerð grein fyrir vettvangsmælingum sem stóðu saman af mælingum á veðri, geislun við yfirborð sjávar, yfirborðshita sjávar, sjávarhæð, sem og þrýstingi, hita, seltu og uppleystu súrefni sjávar á völdu dýpi, auk straumhraða í lóðréttu sniði vatnssúlunnar. Einnig liggja fyrir úr leiðöngnum Hafrannsóknastofnunar mælingar í lóðréttum sniðum á hita, seltu og súrefni, auk bergmálmælinga sem hafa gefið mat á magni síldar innan fjarðar þegar slíkum mælingum var komið við í leiðöngrunum.

Þá er fjallað um einföld líkön meðalsúrefnisstyrks innan fjarðarins sem hjálpa til við að meta mikilvægi þeirra ferla er áhrif hafa á súrefnisstyrkinn, þ.m.t. á líklegum upptakahraða síldar á uppleystu súrefni í sjónum en fyrir lá mjög breitt bil mögulegs upptakahraða síldarinnar. Viðvera síldarinnar innan vegfyllingar er jafnframt illa þekkt og því var reynt að beita þessum einföldu líkönum samhliða mæliniðurstöðum til að leggja mat á líklegar ferðir síldarinnar um fjörðinn.

Flóknari og umfangsmeiri líkönum er síðan gerð skil, en þeim er ætlað að líkja eftir meginstraumum fjarðarins og þeim helstu þáttum er ráða styrk súrefnis. Fyrirliggjandi straumlíkan af Kolgrafafirði hefur verið útvíkkað og endurskoðað til að líkja eftir þeim sjávarhæðar- og straummælingum sem safnað hefur verið í firðinum. Tekur það nú til alls Breiðafjarðar og tekur því m.a. tillit til þeirra miklu

grynninga og þrenginga sem eru til staðar utan við og í mynni Kolgrafafjarðar (Urthvalafjarðar), og hafa mikið með hegðun strauma að gera í firðinum. Sérstöku vatnsgæðalíkani hefur verið komið á fót fyrir Kolgrafafjörð til að líkja eftir súrefnisbúskap fjarðarins. Straumbáttur líkansins hefur verið sannreyndur með hliðsjón af mælingum og straumlíkani Breiðafjarðar auk þess sem sannreynsla súrefnisreikninga hefur farið fram með samanburði við mælingar.

Fjallað er um greiningu umhverfisaðstæðna í firðinum og og samspili þeirra við síldargöngur, sem leitt geta til umtalsverðra áhrifa á súrefnisbúskap fjarðarins. Jafnframt er fjallað um hversu algengt má telja að alvarlegar aðstæður geta myndast út frá þeim gögnum sem fyrir liggja, og er það sett í samhengi við þær aðstæður sem ætla má að hafi verið til staðar í aðdraganda síldardauðaatburðanna. Þá er fjallað um niðurstöður vatnsgæðalíkans þar sem því var beitt gagnvart samanburði súrefnisbúskapar fjarðarins með og án vegfyllingar.

Verkefnið hefur leitt af sér aðferðarfræði og greiningarhæfni sem unnt er m.a. að beita við mat á virkni mögulegra mótvægisáðgerða í Kolgrafafirði til varnar súrefnisskorti við síldargöngur, og er stuttlega fjallað um slíka nálgun. Helstu niðurstöður verkefnisins eru síðan dregnar saman.

2. Forsaga og bakgrunnur rannsóknarverkefnisins

2.1. Síldargöngur og -dauði í Kolgrafafirði veturinn 2012-2013

Í desember 2012 drapst umtalsvert magn síldar í Kolgrafafirði, innan vegfyllingar Snæfellsnesvegjar við Hjarðarbólsodda. Ummerkja vegna þessa atburðar varð vart þann 14. desember og hafa sérfræðingar Hafrannsóknastofnunar áætlað að um 30 þúsund tonn af síld hafi drepist í atburðinum. Dauði síldarinnar hefur verið rakinn til súrefnisskorts í firðinum. Frekari síldardauði átti sér stað í firðinum um einum og hálfum mánuði seinna, en dauðans varð vart þann 1. febrúar 2013. Var þá umtalsvert magn rotnandi lífræns efnis fyrir í firðinum vegna fyrri atburðar. Talið er að um 22 þúsund tonn síldar hafi drepist í þessum seinni atburði.

Meginhluti íslenska sumargotssíldarstofnsins hefur haft vetursetu víðs vegar í sunnanverðum Breiðafirði frá haustinu 2006. Veturinn 2011-2012 varð síldarinnar fyrst vart í verulegu magni innan brúar í Kolgrafafirði. Í janúar 2012 mældist nálægt 300 þúsund tonn af síld innan brúar (Sólveig R. Ólafsdóttir o.fl., 2014).

Þann 11. desember 2012, þremur dögum áður en síldardauðans varð vart þann 14. desember, fóru fram hefðbundnar bergmálmælingar í Kolgrafafirði á vegum Hafrannsóknastofnunar. Var talið að um 275 þúsund tonn af síld væru innan brúar (Sólveig R. Ólafsdóttir o.fl., 2014). Mælt var einnig daginn eftir, þann 12. desember, þar sem bilunar hafði gætt í mælitækjum daginn áður. Bilun reyndist enn til staðar þann dag, en matið frá deginum áður var staðfest þar sem mæling gaf til kynna 270 þúsund tonn af síld innan brúar. Þann 18. desember, fjórum dögum eftir að fyrri síldardauðans varð vart, gáfu bergmálmælingar til kynna að um 10 þúsund tonn af lifandi síld væru innan brúar en utan hennar í firðinum rúmlega 250 þúsund tonn skv. afhentum gögnum frá Hafrannsóknastofnun. Meginhluti þeirrar síldar sem var í innanverðum Kolgrafafirði vikunnar á undan var því kominn í utanverðan fjörðinn. Niðurstöður Hafrannsóknastofnunar benda til að um 10% þeirrar síldar sem var í innanverðum firðinum við bergmálmælingar 11. og 12. desember hafi drepist og að dauðans hafi orðið vart þann 14. desember.

Bergmálmælingar á lifandi síld á tímabilinu 10. – 12. janúar 2013 gáfu til kynna um 220 þúsund tonn af síld innan brúar. Daginn eftir hafði hún hins vegar gengið út aftur að mestu leyti og mældust þá

einungis um 40 þúsund tonn innan brúar. Því virðist sem að um 200-250 þúsund tonn síldar hafi verið á nokkru flakki inn og út um brúaropið í Kolgrafafirði á þeim eina og hálfra mánuði sem leið milli síldardauða- og atburðanna tveggja. Óvíst hefur verið hvað réði því að 22 þúsund tonn síldar drápust til viðbótar í lok janúar (dauðans varð vart 1. febrúar) en ekki í lok desember eða fyrr í janúar.

Miklar síldargöngur hafa verið í Kolgrafafirði án þess að til fiskidauða hafi komið. Ámóta mikið magn síldar mældist innan brúar þann 11. desember 2012, í aðdraganda fyrri síldardauða- og atburðarins, og í janúar veturinn á undan þegar ekki er vitað til að síld hafi drepist. Óvissa ríkti því í kjölfar þessara atburða um hvort og þá með hvaða hætti samspil síldarganga og umhverfisaðstæðna hafi ráðið því að til súrefnisskorts hafi komið sem leiddi til síldardauðans.

2.2. Fiskdauði vegna umhverfisaðstæðna

Umfangsmiklir atburðir fiskdauða eru þekktir bæði héraðs og erlendis frá. Um 20 tonn af eldisþorski í kvíum drapst í Grundarfirði í byrjun árs 2007. Jafnframt fannst dauður fiskur í veiðarfærum og dauð síld sem rekið hafði í fjöru (www.skessuhorn.is; grein frá 11. janúar 2007). Líkleg skýring þótti gríðarlega mikil síldargengd í firðinum sem gæti orsakað mengun eða súrefnisskort í sjónum (www.visir.is; grein frá 13. janúar 2007). Grundarfjörður var þó talinn enn fullur af síld um miðjan janúar 2007. Talinn var þó enn möguleiki á að þetta mikla magn síldar í firðinum hafi orðið til þess að þorskurinn drapst. Önnur kenning var uppi um að brennisteinsmengun væri ástæðan (www.visir.is; grein frá 15. janúar 2007).

Í fréttatilkynningu Hafrannsóknastofnunar frá 19. janúar 2007 (Hafrannsóknastofnun, 2007) greinir frá athugunum stofnunarinnar vegna þessa atburðar, og er niðurstaðan sú að ástæða fiskdauðans sé líklega súrefnisskortur vegna mikils magns síldar. Ennfremur er tilgreint að þetta sé þekkt fyrirbrigði, m.a. í norskum fjörðum, og að rannsóknir erlendis frá sýna að síld getur lifað við lágt súrefnisinnihald sjávar miðað við þorskfiska. Hafrannsóknastofnun áætlaði að um 350-400 þúsund tonn af síld hefði verið í Grundarfirði nokkru eftir að þorskurinn drapst í eldiskvíunum, sem talið var nálægt 65% af áætlaðri stærð alls veiðistofns síldar við landið (Skessuhorn, grein frá 5.3.2007). Í sömu grein er vitnað í Hafrannsóknastofnun og greint frá að ekki aðeins sé síldin inni í Grundarfirði í sama mæli og fyrr, heldur hafi einnig orðið vart við mikla síld inni í Kolgrafafirði og sömuleiðis hafi sést síldartorfur vestan við Grundarfjörð.

Rúmlega 20 tonn af dauðri síld blöstu við heimamönnum á Kvænes ströndinni í Nordreisa, norður Noregi, að morgni 31. desember 2011. Sögusagnir herma að eitthvað svipað hafi átt sér þar stað á níundáratug síðustu aldar (t.d. www.nordlys.no; grein frá 2. janúar 2012). Ekki hafa fundist haldbærar heimildir um ætlaðar orsakir þessa atburðar.

Fiskdauði á dönskum strandsvæðum er nokkuð algengur. Samantekt hefur verið gerð á mörgum þekktum atburðum (Ærtebjerg o.fl., 2003). Orsakir flestra þessara atburða eru raktar til ofauðgunar, annað hvort vegna eiturefna þörungna eða lágs súrefnisstyrks. Í síðarnefnda tilvikinu er það jafnan brennisteinsvetni (H_2S) sem berst við þessar aðstæður frá seti sem er banvænt lífríkinu. Í sumum tilfellum hefur uppsteymi (e. *upwelling*) vatns með lágum súrefnisstyrk eða blandað brennisteinsvetni til yfirborðs leitt til fiskdauðans. Sams konar tilfelli hafa átt sér stað víðar í heiminum, t.a.m í Oman í Persaflóa (Herring, 2002), við Delaware á austurströnd Bandaríkjanna (Luther o.fl., 2004) og í nágrenni Los Angeles í Kaliforníu á vesturströnd Bandaríkjanna (Stauffer o.fl., 2012).

2.3. Hugmyndir og hugrenningar í aðdraganda rannsóknarverkefnis um orsakir súrefnisskorts er olli síldardauða

Hafrannsóknastofnun hefur ályktað að síldardauðinn hafi orsakast af súrefnisskortum (Sólveig R. Ólafsdóttir o.fl., 2013, 2014). Í kjölfar síldardauðans og í aðdraganda rannsóknarverkefnisins voru uppi vangaveltur um hvað gæti hafa valdið súrefnisskortinum og hvort tilkoma vegfyllingarinnar hafi ráðið þar einhverju um. Leitt var að því líkum af sérfræðingum Hafrannsóknastofnunar í kjölfar seinni síldardauða atburðarins að margir samverkandi þættir geti hafi verið valdir að súrefnisþurrðinni eins og t.a.m. að svæðið innan brúar sé nokkuð einangrað frá streymi súrefnisríks sjávar að utan, að mikið lífmagn síldar gengur fljótt á súrefnisstyrkinn, að stillt veður takmarkar loftskipti andrúmslofts og sjávar, að íspekja í innanverðum firðinum stöðvar loftskipti, og að súrefniskrefjandi niðurbrot hafi verið til staðar eftir fyrsta atburðinn (Guðmundur J. Óskarsson, 2013).

Frumframleiðsla liggur í dvala að vetri og óvíst um hvort súrefnissnautt botnvatn í innri firðinum væri tilkomið vegna rotnandi þörunga eða annars lífríkis, mögulega í kjölfar ofauðgunar. Lágur súrefnisstyrkur getur myndast vegna annarra ferla en ofauðgunar, auk þess sem brennisteinsvetni getur borist til sjávar með jarðvarmavatni í gegnum lekar sprungur sem tengjast jarðhitakerfum. Þekkt er jafnframt hvernig jarðhitavatn getur stigið frá botni upp í vatnssúlu sjávar, jafnvel til yfirborðs, vegna eðlisþyngdarmunar og oft leitt til breytinga á súrefnisstyrk sem og flutt brennisteinsvetni (Vogt, 1989).

Í jarðhitaleit ÍSOR við Berserkseyri milli Hraunsfjarðar og Kolgrafafjarðar fyrir hitaveitu til Grundarfjarðar kom í ljós að um 40-50 °C heit laug er á skeri sem liggur 350-400 m frá landi og kemur heita vatnið þar upp um sprungur. Boraðar hafa verið all margar grunnar holur til að mæla hitastigul í grenndinni og hefur komið í ljós að jarðhitakerfið sem þarna er fylgir ANA stefnu skammt undan landi og er í eystri enda gossprungukerfisins í Hraunfirði (ÍSOR, 2004). Ekki var því talið útilokað í aðdraganda rannsóknarverkefnisins að brennisteinsvetnisblandað vatn stigi til sjávar í Kolgrafafirði og gæti það haft eiturvirk áhrif á lífríki auk þess sem það leitast við að hvarfast við súrefni til myndunar brennisteinsdíóxíðs (SO₂) sem almennt telst einnig hafa eiturvirkni gagnvart lífríki. Þetta ferli gæti gengið á einhvern hluta þess súrefnis sem er til staðar í firðinum.

Sjávarfallabylgjan gengur réttisælis umhverfis landið, einn hring á hverjum sveiflutíma. Þannig er flóð við Vesturland þegar fjara er við Austurland og öfugt. Hér við land er hæð sjávarfalla mjög misjöfn. Munur flóðs og fjöru er mestur vestanlands og er um 4 m við stórstreymi í Breiðafirði. Fasamunur er mögulegur í ytra mynni Kolgrafafjarðar og gæti verið viðvarandi straumur réttisælis meðfram landi. Þannig væri innstreymi vestan megin fjarðar en útstreymi austan megin. Spurning hefur verið uppi hvort tilkoma vegfyllingar takmarki ferð þessa straums í firðinum og leiði af sér takmörkun vatnsskipta í innri firðinum.

Fræðileg greining á lóðréttum prófílmælingum af hita og seltu sem Hafrannsóknastofnun safnaði í Kolgrafafirði eftir síldardauðann sem varð þar í desember 2012 gefur til kynna að lagskipting þótt mjög veik sé geti stutt við flutning innri bylgna sem ferðast með lágum bylgjuhraða og eru undir áhrifum snúnings jarðar. Sveifluhæð slíkra bylgna getur verið há og geta sterkir vindar við slíkar aðstæður leitt til uppstreymis botnvatns til yfirborðs og haft þar af leiðandi áhrif á vatnsgæði, t.a.m. með flutningi súrefnissnauðs vatns til svæða sem áður voru súrefnisrík. Einnig geta þessi ferli leitt til lóðréttrar blöndunar vatns. Þótt síldardauðinn sem blasti við mönnum þann 14. desember 2012 varð að undangengnu tveggja daga logni í Kolgrafafirði, ríkti dagana þrjá þar á undan 8-10 m/s sunnanvindur sem snérist í austanvind.

Ríkjandi vindar í desember 2012 og janúar 2013 voru algengir úr norðaustri og austri en einnig var sunnanáttin nokkuð kröftug. Vindsvið yfir firðinum þótti mjög líklega flókið vegna umlykjandi fjalla sem valda skjóli í tilteknum vindáttum. Líklegt mátti þó telja að norðaustan- og sunnanvindar séu nokkuð ákveðnir eftir öllum firðinum og voru uppi spurningar um hvort vegfyllingin takmarki að einhverju leiti vindstrauma inn og út fjörðinn og þar af leiðandi mögulegan efnisflutning með þeim.

3. Gögn

Lagt var í umfangsmiklar vettvangsmælingar í Kolgrafafirði af hálfu Vegagerðarinnar í samstarfi við Hafrannsóknastofnun sem nauðsynlegur liður í því að meta áhrif umhverfisþátta á síldardauðann og kanna hvort vegfyllingin hafi verið einhver áhrifavaldur þar um. Hér verður gert grein fyrir annars vegar framkvæmd vettvangsmælinganna og þeim gögnum sem safnað var, og hins vegar tiltækum gögnum sem sótt voru sérstaklega til viðbótar til stuðnings rannsóknarverkefninu.

Vettvangsmælingar stóðu saman af mælingum á veðri, geislun við yfirborð sjávar, yfirborðshita sjávar, sjávarhæð, sem og þrýstingi, hita, seltu og uppleystu súrefni sjávar á völdu dýpi, auk straumhraða í lóðréttu sniði vatnssúlunnar. Einnig liggja fyrir úr leiðöngurum Hafrannsóknastofnunar mælingar í lóðréttum sniðum á hita, seltu og súrefni, auk bergmálmælinga sem hafa gefið mat á magni síldar innan fjarðar þegar slíkum mælingum var komið við í leiðöngrunum. Yfirlit yfir öll mæligögn sem aflað var í rannsóknarverkefninu og mælitímabil þeirra má sjá á Mynd 1 og í Tafla 1 - Tafla 5. Staðsetning mælistöðva er svo sýnd á Mynd 2.

Viðbótar gögn til stuðnings rannsóknarverkefninu tóku á svipuðum þáttum og mælingunum var ætlað, þ.e. veðurgögn og sjávarhæðargögn, en einnig dýptarmælingar. Nánari grein er gerð fyrir þessu í eftirfarandi umfjöllun.

3.1. Veðurgögn

Veðurgögn samanstanda af veðurmælingum framkvæmdum af Vegagerðinni við Kolgrafafjörð, veðurmælingum afhentum af Veðurstofu Íslands og Vegagerðinni úr öllum veðurstöðvum sem starfræktar eru við Breiðafjörð, og niðurstöðum veðurlíkansreikninga úr líkani Veðurstofu Íslands.

3.1.1. Veðurmælingar við Kolgrafafjörð

Veðurstöð hefur verið rekin við brúna yfir Kolgrafafjörð (V1 á Mynd 2) um nokkurt skeið en vegna rannsóknarverkefnisins voru settar upp þrjár veðurstöðvar nærri bökkum innri Kolgrafafjarðar, sérstaklega til mælinga á vindi en vindsvið innri fjarðarins var talið nokkuð flókið vegna umlykjandi fjalla sem valda skjóli í tilteknum vindáttum. Markmiðið með þessum mælingum var að ákvarða vindálag á vatnsflötinn í firðinum og breytileika þess í tíma og rúmi.

Staðsetningum veðurstöðvanna þriggja var hagað þannig að ein mældi austanmegin í firðinum, við Kolgrafir, merkt V2 á Mynd 2, önnur sunnarlega við fjarðarbotn, merkt V3, og þriðja vestanmegin við Eiði, merkt V4. Tafla 1 inniheldur upplýsingar um mælitíma þessara stöðva og hnit þeirra. Á veðurstöðvunum voru mæld vindhraði, vindátt, hitastig, rakastig og loftþrýstingur á 10 mínútna upplausn í rúmlega 18 mánuði.

Töluverður breytileiki er í tíðni vindátta milli stöðvanna í innri Kolgrafafirði eins og vindrósir veðurstöðva í Kolgrafafirði fyrir mælitímabilið 20.7.2013 – 23.5.2015 gefa til kynna (Mynd 3).

Við fjarðarbotn stendur vindur nánast einungis af landi úr suðri eða frá hafi úr norðri. Aðstæður við Kolgrafir, sem liggja í norður frá veðurstöðinni við fjarðarbotn, milli strandarinnar að vestanverðu og Kolgrafamúla að austanverðu eru nokkuð svipaðar og í fjarðarbotni. Tíðnidreifing á vindrósinni hefur þó snúist lítillega réttisælis miðað við fjarðarbotn. Fjallgarðurinn austan þessara stöðva (Kolgrafamúli, Snjógilskúla, Gjakollur) veitir skjól fyrir austanáttum, en greið leið er fyrir norðlægum og suðlægum áttum meðfram fjallgarðinum. Norðaustanáttin nær sér á strik við Kolgrafir þar sem stöðin er tiltölulega nálægt norðurenda Kolgrafamúla. Vestanáttin er hins vegar sjaldgæf þótt stöðin sé opin fyrir henni.

Veðurstöðin á brúnni er svo berskjaldaðri fyrir fleiri vindáttum en með ríkjandi vindátt af hafi úr norðaustri, eftir ytri firðinum. Sunnanáttin er nokkuð tíð með frekar sterkum vindi og austlægur áttir virðast ná sér þarna á strik. Við Eiði, sem er suðvestur af brúnni, er norðaustanáttin einnig ríkjandi ásamt algengum austanáttum. Vindstyrkur er hins vegar mun lægri en á brúnni og sunnanáttin nær sér ekki á strik.

Að auki var geislunarmæli komið fyrir á bauju í innri firðinum. Baujan var hönnuð þannig að sem minnst hreyfing væri á henni vegna sjávarfalla. Neðst í baujuna var fest þung keðja með viðbótar þyngingu neðst í keðjunni. Um 50 m langt band var síðan fest neðarlega í keðjuna, en stærra lóð var fest í hinn enda bandsins á botni. Mælirinn er af gerðinni NR01-L, framleiddur af Hukseflux (seldur af Campbell Scientific). Honum var komið fyrir eins ofarlega á baujuna og hægt var svo baujan skyggði ekki á vatnsflötinn sem geislun var mæld frá. Hann mældi inn- og útfallandi stutt- og langbylgjugeislun með 30 sekúndna upplausn.

Úr þessum mæli fengust nokkuð samfelldar geislunarmælingar í rúmt ár en vegna staðsetningar mælisins þurfti að þrifa og þjónusta mælinn alls 8 sinnum yfir mælitímabilið. Gæði þessara mælinga eru talin nokkuð góð fyrir utan truflanir í útfallandi stuttbylgjugeislun vegna veltings baujunnar.

3.1.2. Veðurmælingar við Breiðafjörð

Veðurstofa Íslands og Vegagerðin afhentu mælingar úr öllum veðurstöðvum sem starfræktar eru við Breiðafjörð. Yfirlit og mælitímabil veðurstöðvanna má sjá í Tafla 6.

3.1.3. Veðurlíkansreikningar

Veðurstofa Íslands afhenti veðurreikninga úr veðurreiknilíkaninu Harmonie í 2,5 x 2,5 km upplausn í plani og 1 klst í tíma frá september 2009 til júní 2014. Líkangögn veðurlíkansins innihalda m.a. loftþrýsting, lofthita, raka, geislun, vindþætti í vestur-austur og norður-suður stefnur, úrkomu og áætlað afrennsli af landyfirborði. Afrennsli af landyfirborði var metið sem summan af líklegri snjóbráðnun og regni, og var þar af leiðandi gróft mat sem gerði ekki ráð fyrir uppgufun eða írennsli í jarðveg. Líkansvæðið sem Harmonie veðurreikningarnir ná yfir má sjá á Mynd 4.

Að auki afhenti Veðurstofa Íslands gögn úr WRF veðurlíkaninu, sem reiknuð voru af Reiknistofu í veðurfræði, fyrir tímabilið ágúst 2007 til október 2009 í 3 x 3 km upplausn í plani og 3 klst í tíma. Þessi gögn innihéldu reiknaðan vind í 10 m hæð og loftþrýsting við yfirborð.

Veðurreikningar úr Harmonie voru nýttir til þess að mynda vindsvið í straum- og vatnsgæðalíkonin. Þar voru reiknuð gildi á vindhraða og loftþrýstingi brúuð inn á reikninet líkananna. Þessi gögn voru lykिलinntak í vatnsgæðalíkanið til þess að geta reiknað súrefnisflutning um yfirborð sjávar vegna vindálags í Breiðafirði, en voru einnig nýtt sem inntak í straumlíkan. Í Kolgrafafirði voru veðurmælingarnar á veðurstöðvunum í firðinum nýttar til þess að mynda vindsviðið í líkónunum fyrir þau reiknitímabil

Þegar slíkar mælingar eru tiltækar. Fyrir tímabil þar sem slíkar mælingar vantar voru veðurreikningar Harmonie nýttir í Kolgrafafirði.

3.2. Sjávarhæðargögn

Upplýsingar um sjávarhæð fengust með mælingum á vegum Vegagerðarinnar í Kolgrafafirði, mælingum annars staðar úr Breiðafirði bæði á vegum Vegagerðarinnar og Sjávarorku, og úr sjávarfallalíkani Vegagerðarinnar.

3.2.1. Sjávarhæðarmælingar í Kolgrafafirði

Settir voru út sjávarhæðarmælur á fjórum stöðum í Kolgrafafirði (merktir með H1-H4 á korti, Mynd 2). Upplýsingar um mælitíma þessara stöðva og hnit þeirra er að finna í Tafla 2. Mannvit annaðist þessar mælingar fyrir hönd Vegagerðarinnar og gaf út skýrslu þar sem greint er frá framkvæmd og niðurstöðum mælinganna, (Mannvit, 2014). Nánast samfelldar mælingar fengust á sjávarhæð í rúmlega eitt ár.

Við innbyrðis samanburð sjávarhæðargagnanna mátti merkja töluverða óreglu sem benti til þess að mælarnir hefðu ekki sama viðmið fyrir hæð nemanna. Fyrir fyrstu 3 mánuði mælitímaraðarinnar mátti merkja töluverðan mun milli mælis H3 og H2, allt að 30 cm hærrí stöðu innan Kolgrafafjarðar en í mynni hans í vikulegum meðaltölum, en almennt var munur milli mælanna minni. Við nánari greiningu mátti sjá að mismunur milli mælanna var flókinn og því erfitt að leiðrétta þessar skekkjur yfir tímaröðina, brugðið var á það ráð að leiðrétta gögnin fyrir samanburð við líkangögn með því að draga frá meðaltal þess tímabils sem bera átti saman við reiknaðar sjávarhæðir hverju sinni.

3.2.2. Sjávarhæðarmælingar í Breiðafirði

Vegagerðin afhenti mælingar á sjávarhæð í Ólafsvíkurhöfn sem hefur verið mæld á 10 mínútna fresti frá mars 1997 og eru mælingar þar enn í gangi. Mælingarnar eru þó töluvert glöppóttar.

Sjávarorka veitti leyfi til að nota sjávarhæðarmælingar þeirra úr Breiðafirði sem verkfræðistofan Vista annast. Um er að ræða 10 mínútna mælingar á 5 stöðum í Breiðafirði. Mælistaðirnir eru kenndir við Stykkishólms höfn, Stykkishólmsnes, Búðardal, Flatey og Brokey og eru til í mislögum tímaseríum á tímabilinu lok ágúst 2007 til um miðjan júlí 2011.

3.2.3. Sjávarhæðarreikningar

Vegagerðin afhenti sjávarhæðarreikninga úr sjávarfallalíkani þeirra. Þessir reikningar eru unnir á 2x2 km upplausn í plani og 1 klst í tíma og voru nýttir til sannprófunar á sjávarfallalíkani hnattræna sjávarfallalíkansins TPXO (sjá í kafla 4.2) sem nýtt var sem jaðarskilyrði í straumlíkan, en reiknuð sjávarfallahæð á jaðri straumlíkansins þurfti hærri upplausn í tíma en 1 klst.

3.3. Straumsjármælingar

Starfsmenn Hafrannsóknastofnunar settu út tvær straumsjár (ADCP) á 5 mismunandi staði sunnan vegfyllingar í 3 mismunandi lotum (sjá Tafla 4). Þær voru af gerðinni Workhorse Sentinel frá Teledyne RD. Þær mæla straumhraða með því að senda frá sér hljóðbylgjur í vatnsbolinn og nema svo endurvarp þeirra frá ögnum sem berast með straumnum. Greining endurvarpsins með hliðsjón af Doppler áhrifum gerir kleift að meta hraða og stefnu straumsins eftir dýpi (Teledyne, 2007).

Fyrsta lotan hófst 15. maí 2013, önnur straumsjáin var sett í mesta dýpinu og er sú stöð hér kölluð HFS, hin var sett norðaustan af HFS straumsjáinni í töluvert minna dýpi og er sú stöð hér kölluð HNA. Í

Í lok júlí 2013 hófst önnur lota þegar HFS var færð til suðvesturs og er stöðin hér kölluð HSV en ekki tókst að ná upp HNA og kláraði hún hleðsluna í byrjun nóvember. HNA og HSV voru sóttar í byrjun desember 2013. Um miðjan janúar 2014 hófst svo síðasta lotan þegar farið var með straumsjárnar aftur í fjörðinn og þær settar sunnar í firðinum til vesturs og austurs þar sem botndýpi er um 27 m. Þær stöðvar eru hér kallaðar HFV og HFA. HFV og HFA voru sóttar 25. apríl 2014. Staðsetningar straumsjármælistaðanna má sjá á Mynd 2.

Allar straumsjárnar voru festar á bauju nærri botni og vísuðu til yfirborðs, þær mældu hraðaprófil í vatnsbolnum á 30 mínútna fresti. Baujan var um 4 m yfir botni, en lögnin var fest með um 120 m löngum streng við lóð sem fest var við belg sem flaut á yfirborðinu.

Úrvinnsla straumsjármælinganna fól að mestu í sér aðgreiningu á þeim mælingum sem nýtast beint við straumhraðaákvörðun og yfirfærslu á það form sem nýttist greiningu mæliniðurstaðna og samanburði við reiknilíkaniðurstöður. Þeir þættir sem ráða mestu um gögn sem ekki nýtast eða einungis að takmörkuðu leyti eru breytilegt mælisvið straumsjárnar eftir sjávarföllum, færsla lagnar sem straumsjáin var á og innri úrvinnsla mælitækisins byggt á viðmiðunum framleiðanda.

Mælisvið straumsjárnar er um 4 m frá botni og upp fyrir vatnsborð á 1 m millibili. Hæð vatnsborðs sveiflast með sjávarföllum og því er mælisviðið breytilegt í tíma. Hæð straumsjár frá botni var áætluð 2 m í öllum tilvikum út frá upplýsingum frá Hafrannsóknastofnun og miðpunktur fyrsta 1 m mælibils straumsjárnar er í 2,1 m fjarlægð frá henni. Miðpunktur fyrsta mælibils var því í u.þ.b. 4 m hæð frá botni. Á öllum lögnum þar sem straumsjám var komið fyrir, var einnig komið fyrir MicroCAT mælitæki sem mældi þrýsting, hitastig, seltu og súrefni (sjá kafla 3.4.2). Þrýstingsmælinguna var hægt að nota til ákvörðunar á dýpi að teknu tilliti sveiflu vatnsborðs yfir mælilögninni.

Straumsjánni var komið fyrir á streng sem festur var í akkeri á botni og haldið strekkjum með floti nokkrum metrum frá botni. Strengurinn og þar af leiðandi straumsjáin hreyfist með sjávarstraumum. Hreyfingin getur verið mismikil vegna snúnings um lóðréttan ás eða veltings um lárétta ása, án þess að akkeri lagnarinnar færast úr stað. Straumsjáin á að geta leiðrétt að nokkru leyti fyrir slíku en framleiðandi gefur upp mesta leyfilega halla mælis sem 15° um láréttan ás. Ákvörðun straumhraða getur því mögulega verið háð einhverri óvissu þegar mælistrengurinn sveiflast um akkeri sitt.

Við mælingarnar í Kolgrafafirði eru einnig nokkur dæmi þess að lagnir færðust úr stað. Þar sem MicroCAT mælarnir mæla þrýsting og straumsjárnar halda utan um snúning og veltung mælitækisins, fást vísbendingar um færslur lagnanna, hvenær þær eiga sér stað og er þá hægt að leiðrétta dýpi mælibila straumsjánna eftir þörfum. Þar sem straumsjáin hefur ekki fast viðmið til ákvörðunar straumhraða við slíkar aðstæður nýtast hraðamælingarnar einungis að takmörkuðu leyti í slíkum atburðum.

Sem dæmi má taka færslu lagnar HFS samanber útlistun í kafla 3.4, en meðaldýpi mælisins minnkaði um 3,6 m þann 28. maí 2013, sjá Mynd 15. Með ítarlegri skoðun á dýptarbreytingum lagnarinnar má búa til leiðréttingu sem síðan er notuð til að koma öllum mælitímabilinu í fasta viðmiðunarháð. Hér liggur beinast við að nota meðalsjárvarhæð til slíkrar viðmiðunar, en neðra grafið á Mynd 5 sýnir dýptarmælinguna á efra grafinu færða í meðalsjárvarhæð. Önnur færsla lagnarinnar þann 7. nóvember þar sem meðaldýpi eykst aftur um 1 m hefur fengið sömu meðhöndlun.

Innri úrvinnsla straumsjár við mælingar metur gæði mælingar og hvort einstaka mælingum sé hafnað á grundvelli tölfræðilegra frávika eða af öðrum orsökum eftir því sem viðmiðanir framleiðanda krefjast.

Mynd 6 greinir frá 10 daga tímabili straumsjármælinga á lögn HFS sem spannar m.a. dæmið sem hér að ofan er tekið við leiðréttingar vegna færslu lagnarinnar. Jafnframt hefur farið fram hreinsun

gagnanna vegna mælisviðs mælisins sem og tekið tillit til innri úrvinnslu hans. Vel sést á neðstu tveimur gröfum myndarinnar hvernig mælirinn færast nær yfirborði sjávar á degi 147, sem svarar til 28. maí 2013. Mælirinn greinir frá snúningi sínum um lóðréttan ás meðan á þessu stendur (næst efsta graf) sem og snúningi um lárétta ása (miðjugraf). Straumsjáin ætti að ná að leiðrétta að einhverju leiti fyrir snúningnum, alla vega þegar hann er innan viðmiðunarmarka framleiðanda (15°), en greinilega svörun má þó sjá í mældum straumhraða samhliða sterkum útslögum í snúningi mælitækisins. Einhver óvissa getur því ríkt í ákvörðun straumhraða við þessar aðstæður.

Færsla lagnarinnar sjálfrar leiðir til þess að óvissa ríkir í mældum straumhraða þegar hún er á ferð. Því er óvíst að straumhraði hafi farið vel yfir 50 cm/s meðan á færslunni stóð eins og mælingar gefa til kynna. Hvort 40–45 cm/s straumhraði sem mældist á aðfallinu þar á undan eigi við rök að styðjast liggur ekki fyllilega ljóst fyrir þar sem snúningur tækisins var mjög merkjanlegur. Straumurinn virðist þó ekki hafa fært lögnina úr stað, nema það hafi þá verið færsla eftir sömu dýptarlínu og því ekki hægt að greina í þrýstingsmælingunum. Fjölmörg dæmi eru um háan straumhraða í straumsjármælingunum á stórstreymi. Ekki hefur fyllilega verið greint undir hvaða skilyrðum straumhraðinn verður svona hár, en það virðist þó einungis eiga við þegar útslag sjávarfallabylgjunnar er hvað mest og svörun er greinileg í snúningi mælitækisins um ása sína.

Mynd 7 og Mynd 8 sýna dæmi um niðurstöður straumsjármælinga þegar snúningur mælitækis um ása sína er óverulegur. Mælitækin voru staðsett innarlega í firðinum á þessum tíma, við HFV og HFA (Mynd 2), og straumhraði þar töluvert lægri en utar þar sem tækin höfðu verið staðsett áður. Mesti straumhraði er um 20 cm/s og virðist aukning í hraða falla bæði saman við stórstraum sem og þegar vindur er sterkari. Yfirlit sem þessi fyrir straumsjármælingarnar í heild sinni er að finna í Viðauka A.

3.4. Vatnsgæðamælingar

3.4.1. Yfirborðshiti sjávar

Yfirborðshitamælar voru settir út á sjö stöðum í Kolgrafafirði (merktir með Y1–Y7 á korti, Mynd 2). Upplýsingar um mælitíma þessara stöðva og hnit þeirra er að finna í Tafla 3. Mannvit annaðist þessar mælingar fyrir hönd Vegagerðarinnar og gaf út skýrslu þar sem greint er frá framkvæmd og niðurstöðum mælinganna, (Mannvit, 2014). Hitamælir Y2 rak á land í lok ágúst en var aftur settur út 24. september 2013 en þá voru einnig allar baujur með yfirborðshitamælum teknar upp í stutta stund vegna viðhalds. Frá febrúar 2014 fram í miðjan mars vantar gögn í nokkra mæla þar sem rafhlöður entust skemur en búist var við. Í mars 2014 kom í ljós að búíð var að stinga gat á bauju Y6 sem olli hæðarbreytingu á baujunni. Í byrjun apríl losnaði svo bauja Y6 og rak á land, hún var geymd í húsi þangað til hún var sett aftur út 11. júní 2014. Baujur Y2 og Y7 týndust á tímabilinu 14. mars – 11. júní, því eru ekki til gögn fyrir þá mæla eftir 14. mars. Þann 28. ágúst 2014 var ný bauja sett út þar sem Y7 var áður staðsett, til að klára mælitímabilið.

3.4.2. Hita-, seltu-, þrýstings- og súrefnismælingar í vatnsbolnum

Til þess að mæla vatnsgæðapætti í Kolgrafafirði settu starfsmenn Hafrannsóknastofnunar út 10 mæla af gerðinni MicroCAT 37SMP-ODO (Sea Bird Electronics). Þessir mælar notast við dælu sem tekur inn sjó og mælir hita, uppleyst súrefni og leiðni (sem notuð er til að reikna seltu) í sýninu sem mælirinn tekur inná sig. Við hverja mælingu fer dæla í gang og skipt er um vatn í mælihólfinu. Einnig er mældur þrýstingur á utanverðum mælinum sem er leiðréttur með mældum hita (Sea-Bird Electronics, 2012). Út frá mælingunum má reikna eðlismassa sjávar á hverjum tíma.

Tveir MicroCAT mælar voru settir á straumlagnir Hafrannsóknastofnunar. Átta mælar voru settir á 3 lagnir á vegum Vegagerðarinnar, en þar af gaf einn mælir engin gögn í fyrri mæliлотu og var því tekinn upp. Þessara lagna var vitjað einu sinni áður en þær voru teknar upp endanlega 3. nóvember 2013. Lagnir frá Vegagerðinni voru stilltar á 5 mín upplausn (þ.e. stakar mælingar á 5 mín fresti) en mælar frá Hafrannsóknastofnun á 10 mín. Tafla 5 inniheldur upplýsingar um mælitíma þessara stöðva og hnit þeirra.

Hver mæliłögn var fest í lóð sem hvíldi á botni, og henni haldið strekktri með floti nokkra metra frá botni. Í lóð mæliłagnar var festur um 200 m langur strengur sem tengdur var öðru lóði á hinum enda sínnum. Í það lóð var svo festur strengur með belg sem flaut á yfirborðinu svo unnt væri að nálgast lagnirnar með þægilegum hætti. Hnit mælistrengja og belgja voru skráð þegar lagnirnar voru settar út. Ólíklegt er hins vegar að nákvæm staðsetning þeirra hafi verið skráð þegar þeirra var vitjað, þar sem hnit þeirra voru uppgefin þau sömu og upprunalega hafði verið skráð

Lagnirnar frá Vegagerðinni voru nefndar L1, L2 og L3. Lögn L1 var með tvo mæla, sá sem var staðsettur ofar á lögninni var nefndur L1e og sá sem var neðar L1n. Eins fyrirkomulag var á L2 með mæla L2e og L2n. Lögn L3 var með þrjú mæla, L3e og L3n auk L3m sem staðsettur var á milli L3e og L3n í dýpi.

Lögnunum frá Hafrannsóknastofnun, mælitímabilum þeirra og staðsetningum er lýst í kaflanum á undan um straummælingar, en MicroCAT mælarnir voru á sömu lögnum.

Þegar mælingarnar úr MicroCAT mælunum voru skoðaðar komu í ljós breytingar á mældum þrýstingi í nokkrum mælum sem gáfu til kynna færslu á sjálfri mæliłögninni. Slíkar færslur þurfa að vera kunnar, bæði gagnvart greiningu mæligagna og til samanburðar mælinga og niðurstaðna reiknilíkans, en erfitt getur reynst að framkvæma slíkan samanburð ef staðsetning mælanna þegar mælingarnar fóru fram er ekki kunn.

Þær lagnir sem mælingar gefa til kynna að hafi færst úr stað eru L3, HFS og HSV. Séu þrýstingsmælingar L3 skoðaðar, umreiknaðar yfir í dýpi, sjást nokkur stökk þar sem meðaldýpi mælanna breytist (Mynd 9). Það fyrsta á sér stað 3. nóvember 2013, þegar lagnarinnar var vitjað. Hún var þá tekin upp og sett út aftur um 3 klst seinna á stað sem var um 1 m grynnri en upphafsstaðurinn. Á hádegi 5. desember á sér stað töluverð færsla sem nemur um 16,7 m yfir í meira dýpi á um 80 mínútum (Mynd 10). Meðalbotndýpi L3 eftir vitjun 3. nóvember 2013 er um 21,5 m sem þýðir að lögnin hafi færst yfir í um 38 m meðalbotndýpi 5. desember. Lögnin virðist nú einnig vera staðsett þar sem hún færst auðveldar úr stað eða í sterkari straumi, þar sem áberandi sveiflur á dýpi byrja að mælast á stórstreymi á innfalli og liggjandanum á flóði, sjá Mynd 11. Við þessar aðstæður gæti straumurinn hafa náð að hreyfa lögnina úr stað en meðfram sömu dýptarlínu þar sem mælt meðaldýpi helst nokkuð stöðugt. Einnig er mögulegt að lögnin leggist undan straumnum og sveiflist þannig um ankeri sitt. Dýptarsveiflur eru þó nokkuð stærri fyrir efsta mælinn en þann neðsta sem styður það.

Dagana 16. janúar og 3. mars berst lögnin þó greinilega yfir á minna dýpi þar sem meðaldýpið minnkar um rúman 1 m og svo um 2,4 m. Endanlegt staðsetning að þessum færslum loknum hefur því mögulega verið einhvers staðar nálægt 35 m dýptarlínunni í syðri hluta fjarðarins, sjá skyggða svæðið á Mynd 12.

Í hádeginu 5. desember voru smábátar að síldarveiðum í firðinum og líklegast þykir að lögnin hafi borist með einum slíkum yfir í þetta aukna dýpi, frekar en með sterkum straumi. Ekki voru því forsendur til frekari greiningar á mögulegri staðsetningu L3, byggða á reiknuðum straumhraða í firðinum. Hafi lögnin borist með báti er ljóst að hún hefur getað færst mun lengra en eðlilegur straumur á þessu svæði gæti borið hana og gæti hafa endað hvar sem er nálægt 35 m dýptarlínunni á Mynd 12. Líklegra má þó telja að hún hafi verið sunnarlega nálægt 35 m dýptarlínunni, þ.e. nær upphaflegri staðsetningu

L3, sjá skyggða svæðið á Mynd 12. Ný staðsetning lagnarinnar virðist ekki hafa verið skráð þegar hún var tekin upp um vorið. Vegna þess hvernig lögnin er sett upp með streng milli mællagnar og strengs með belg á yfirborði er mögulegt að mællögnin hafi færst án þess að mjög sýnileg færsla hafi verið á yfirborðsbelg og þ.a.l. villt um hugsanleg færslu mællagnarinnar.

Meðaldýpi HSV minnkar um tæpa 2 m 24. ágúst 2013, sjá Mynd 13. Önnur færsla verður þann 3. nóvember þar sem meðaldýpi minnkar um 5 m. Þetta átti sér stað þegar reynt var að taka upp mælinn án árangurs vegna erfiðra aðstæðna. Á staðnum var metið að mælirinn hafi færst um 400 m til suðurs frá upphaflegri staðsetningu. Miðað við upphaflegt botndýpi um 18 m og mat á færslu mælisins er líkleg staðsetning hans sýnd á Mynd 14 þar sem 11 og 12 m dýptarlínur skerast við 400 m langan gráan geira frá upphaflegu staðsetningunni.

Meðaldýpi HFS minnkar um 3,6 m 28. maí 2013, sjá Mynd 15. Önnur færsla á sér stað þann 7. nóvember þar sem meðaldýpi eykst aftur um 1 m. Miðað við þessa færslu og upphaflegt meðalbotndýpi um 38,5 m er líkleg staðsetning HFS sýnd sem skyggt svæði að 36 m meðaldýptarlínunni á Mynd 16. Svæðið er skorið þar sem mælirinn hefði annars þurft að fara yfir dýpra svæði áður en hann berst yfir á grynnra svæði, en ekki er vísbending um það í mælingunum.

Mynd 17 sýnir mælingar úr hluta af mælitímabili mællagnar L3. Sambærilegar myndir fyrir allar MicroCAT mælingar sem fram fóru í Kolgrafafirði má sjá í Viðauka B. Þar má sjá mæld gildi á leiðréttum þrýstingi, uppleystu súrefni, súrefnismettun, hita, eðlisþyngd sjávar og seltu og eru allir mælar hvernar lagnar sýndir á sömu mynd fyrir mismunandi tímabil. Staðsetning mynda fyrir hvern mæli lagnarinnar vísar í staðsetningu mælitækisins á lögninni, efsta mynd vísar í efsta mæli og neðsta mynd í neðsta mælinn o.s.frv.

3.4.3. Nettengdur súrefnismælir

Í nóvember 2013 setti Hafrannsóknastofnun út nettengda mælistöð til rauntíma vöktunar á ástandi fjarðarins. Mælirinn, sem er framleiddur af YSI, mældi þrýsting, súrefnisstyrk, sjávarhita og leiðni. Síriti mælisins var látinn reikna út seltu og súrefnismettun út frá mældum gildum. Mælinum var ætlað að gefa stöðuna í Kolgrafafirði í rauntíma svo hægt væri að bregðast við ef súrefnismettun yrði óeðlilega lág. Mælirinn var tekinn upp um miðjan maí 2014. Upplýsingar um mælitíma þessarar stöðvar og áætluð hnit hennar má finna í Tafla 5, en staðfest hnit fengust ekki uppgefin. Áætluð hnit miðast við staðsetningu mælisins á myndum frá Hafrannsóknastofnun.

3.4.4. Sýnatöku- og sondumælingar

Hafrannsóknastofnun framkvæmdi sondumælingar í 11 leiðöngrum á tímabilinu 18. des 2012 – 25. apríl 2014. Þessar mælingar eru með þeim hætti að mæligrind með síritandi mælum er látin síga frá yfirborði niður að botni á völdum stöðum og er mælingum safnað á leiðinni niður. Fyrstu þrjár leiðangrarnir gáfu hitastig, seltu og eðlisþyngd sjávar en eftir það fengust einnig mæld gildi súrefnisstyrks og mat á súrefnismettun. Þessar mælingar gefa því miklar upplýsingar um breytileika þessara þátta eftir dýpi og staðsetningu.

Tekin voru sýni í flöskur í a.m.k. 8 framangreindra leiðangra. Afhent voru niðurstöður greininga á súrefnisstyrk úr 7 þessara leiðangra, frá 10.1.2013 til 15.5.2013. Niðurstöður mælinga úr sýnatöku 18. des. 2012 voru gefin upp myndrænt frá Hafrannsóknastofnun úr fyrstu niðurstöðum þeirra eftir leiðangurinn 18. Desember 2012.

Tvær sondumælingar fóru fram á viðmiðunartímabili rannsóknarinnar fyrir síldargöngur (sjá nánar í kafla 4.3.3), 5. desember 2013 og 28 janúar 2014. Þann 5. desember voru mælingar framkvæmdar á

fjórum stöðvum (tveimur innan vegfyllingar og tveimur utan hennar), þar af var súrefnisstyrkur mældur á tveimur stöðum utan vegfyllingar og á einum stað innan, sjá Mynd 18. Mælingin innan vegfyllingar fór fram seint á útfalli og mældist styrkur frá um 5 ml/l við botn í um 9 ml/l við yfirborð. Utan vegfyllingar var mælt við upphaf aðfalls. Styrkur mældist lægri utan vegfyllingar. Erfitt er að ráða út frá þetta takmörkuðum mælingum um orsakir þessa munar. Á þessum tíma eru suðlægar áttir ríkjandi á mælistöðvum í Kolgrafafirði. Mögulega hefur orðið virkari endurnýjun súrefnis í innri firði en utar í firðinum. Hitastig er lítillega lægra innan vegfyllingar sem leiðir til aukins mettnarstyrks.

Þann 28. janúar var súrefnisstyrkur mældur á 10 stöðum, öllum innan vegfyllingar nærri liggjandanum á flóði. Á þremur stöðum næst vegfyllingunni mældist styrkur hærri en sunnar í firðinum. Lægsti styrkinn mældist á 4 syðstu mælistöðunum, en þar á milli eru mælingar þar sem miklar sveiflur eru í súrefnisstyrk. Tiltölulega flóknar aðstæður ríkja í firðinum á þessum tíma og eru þær nánar greindar við nýtingu gagnanna til stuðnings líkangerðar (sjá kafla 4.3).

3.5. Mat á magni síldar

3.5.1. Bergmálmælingar vegna lifandi síldar

Hafrannsóknastofnun framkvæmdi 12 bergmálmælingar frá 11. des 2012 – 12. mars 2014. Við mælingarnar er siglt með svokallað botnstykki sem sendir frá sér fjölda hljóðbylgna, við endurkast þessara bylgna má meta magn síldar eftir dýpi eftir því sniði sem siglt er í firðinum. Botnstykkið var bilað í mælingunum 11.12.2012, 12.12.2012, 18.12.2012, 10.1.2013 og 12.1.2013 og því má búast við stærri skekkjum í mati síldarmagns í þeim leiðöngrum.

Bergmálmælingar á síld 11.12.2012 gáfu til kynna að um 275 þús. tonn væru í Kolgrafafirði, og að síldin væri að mestu innan brúar (Sólveig R. Ólafsdóttir o.fl., 2014). Vegna bilunar í mælitæki var farið aftur daginn eftir og fékkst þá út sambærilegt mat á magni síldar eða um 270 þús. tonn. Mynd 20 sýnir hlutfallslega dreifingu síldar í Kolgrafafirði þann 12. desember 2012. Þann 18.12.2012 var metið að um 250 þús. tonn síldar væri utan brúar og um 10 þús. tonn fyrir innan hana.

Þann 12.3.2013 var magn síldar aftur metið en hlutfallslega dreifingu síldarinnar í plani má sjá á Mynd 21. Þá var metið um 120 þús. tonn í Kolgrafafirði, þar af um 60% innan brúar. Í Grundarfirði var metið út frá bergmálmælingu að um 90 þús. tonn síldar væru þar. Heildarmagn í Kolgrafafirði og Grundarfirði var því um 210 þús. tonn. Þetta mat sýndi að svipað magn af síld var á ferðinni samanlagt í Kolgrafafirði og Grundarfirði og var eingöngu í Kolgrafafirði í fyrri mælingum. Þessa dreifingu á stofninum sem þarna var á ferðinni var hægt að nýta með þeim hætti að þegar eingöngu var mælt innan Kolgrafafjarðar, eins og raunin var í þeim bergmálmælingum sem fylgdu eftir, var unnt að leggja mat á mögulegt magn utan fjarðarins. Jafnframt var þetta nýtt við uppsetningu á svæðisbundinni dreifingu síldar í vatnsgæðalíkaninu.

Þann 28.10.2013 fannst engin síld í Kolgrafafirði. Þann 28.11.2013 var hins vegar metið að um 50 þús. tonn væru til staðar (sjá hlutfallslega dreifingu á Mynd 22), 60 þús. tonn þann 11.1.2014 (sjá hlutfallslega dreifingu á Mynd 23) og 85 þús. tonn þann 12.3.2014 (sjá hlutfallslega dreifingu á Mynd 24).

3.5.2. Myndgreining vegna dauðrar síldar

Hafrannsóknastofnun lagði mat á magn dauðrar síldar á botni fjarðarins með myndgreiningu. Fyrri greiningin fór fram 18.12.2012 og sú seinni 4.2.2013. Þessi greining fólst í að myndir af hluta sjávarbotns Kolgrafafjarðar voru nýttar til þess að leggja sjónrænt mat á meðalfjölda dauðra fiska á m² sem

út frá gefinni meðalþyngd síldar og flatarmáli fjarðarins gaf mat á heildarmagn dauðrar síldar hverju sinni.

Þann 18.12.2012 gaf sjónrænt mat Hafrannsóknastofnunar út frá myndatökum af botni Kolgrafa-fjarðar innan brúar að meðalfjöldi dauðrar síldar á m² væri um 7 stykki. Út frá meðalþyngd 280 gr. síldar þá gaf þetta mat að um 30 þús. tonn hafði drepist í firðinum þegar dauðans varð vart 14.12.2012.

Svipuð greining fór fram 4.2.2013 eftir að síldardauða hafði orðið vart deginum á undan. Þá var eingöngu dauð síld í vestanverðum firðinum, við Eiði. Með sömu aðferð var metið að um 22,5 þús. tonn hafi drepist þá. Samtals hafi því um 52,5 þús. tonn af síld drepist í þessum tveim atburðum.

3.6. Dýptarmælingar

Sjómælingar Íslands afhentu umfangsmikil og ítarleg dýptargögn af stærstum hluta Breiðafjarðar. Mælingar vantaði fyrir firði á norðaustanverðum Breiðafirði sem og í Hvammsfirði, Álftafirði og Hraunfirði. Að auki afhentu Sjómælingar Íslands sjókort nr. 172 (frá 1896) af Hvammsfirði til frekari dýptarákvörðunar fyrir fjörðinn. Til viðbótar voru nýttar fjölgeislamælingar frá Vegagerðinni frá innri firði Kolgrafafjarðar og í brúaropi sem og vegsnið fyrir vegfyllinguna.

Auk þess afhenti Vegagerðin dýptarmælingar frá Skipavík og af höfnum Ólafsvíkur og Stykkishólms. Eldri dýptarmælingar frá Kolgrafafirði voru notaðar til að byggja dýptargrunn án vegfyllingar þegar það átti við. Dýptargrunnar eldri líkana Vatnaskila mætti nota til að bæta núverandi dýptargrunn en meðal þeirra fjarða sem þegar hafa verið settir upp í líkan eru Gilsfjörður, Þorskafjörður, Djúpfjörður, Gufufjörður, Kerlingarfjörður og Kjálkafjörður. Ekki var talin ástæða til að sameina þessa dýptargrunna að sinni.

4. Líkangerð

4.1. Einfaldir reikningar á meðalsúrefnisstyrk

Einfaldir reikningar á meðalsúrefnisstyrk innan fjarðar voru framkvæmdir með það að markmiði að þrengja bilið sem forsendur inn í tvívíða súrefnislíkanið spanna með tilliti til súrefnisupptöku síldar, magns hennar og dreifingar. Forsendur súrefnisupptöku síldar í upphafi rannsóknarverkefnisins voru gefnar af Hafrannsóknastofnun á bilinu 0,09 – 0,35 ml O₂/g_{fisk}/klst byggt á heimildum um aðrar fisktegundir þar sem ekki lágu fyrir slíkar forsendur fyrir síld. Efri mörk þessa bils eru nær því fjórföld lægri mörk og ljóst var því að þrengja þyrfti þetta bil gagnvart rannsóknarverkefninu. Önnur breyta sem bundin er mikilli óvissu er magn síldarinnar á þeim tíma sem súrefnismælingar fóru fram. Þar er upp að vissu marki hægt að nýta þrjár bergmálmælingar frá Hafrannsóknastofnun, ásamt mati úr einum leiðangri byggt á fiskileitartæki. Þær gefa aftur á móti einungis mat á því magni sem var innan vegfyllingar á þeim tíma en ekki á heildarmagni síldar sem var á ferðinni í firðinum.

Sú nálgun var tekin við meðaltalsreikningana að velja tímabil í mældu tímaröðunum þar sem talið er að síld hafi verið til staðar og þar sem fall var í mældum súrefnisstyrk og stilla óþekktar breytur, magn og súrefnisupptöku síldar, að þeim mælingum. Reikningarnir gera ráð fyrir að fjörðurinn innan vegfyllingar sé sem lokað lón, þar sem einungis er reiknað súrefnisinnflæði um yfirborð frá vindi en ekki frá sjávarföllum eða öðrum umhverfisþáttum, og var því megininntak líkansins mæld klukkustundargildi vinds við brúna. Séu mælingar súrefnis greindar, sjá t.a.m. Mynd 17, má greinilega sjá þátt sjávarfallanna þar sem þau bera súrefnisríkari sjó að mælistöðunum sem reglulega toppa á um 12 klst millibili. Þessa hegðun er augljóslega ekki hægt að herma með einföldum meðaltalsreikningum

sem þessum, en hægt er að fá mat á breytingum á stærri tímaskala þar sem vindur ræður miklu gagnvart umhverfisaðstæðum.

Bergmálmælingar á síld á þessu tímabili innan brúar eru frá um 50 til 85 þúsund tonn en með því að reikna með slíku magni föstu í líkaninu reiknast margfalt minni súrefnisstyrkur en mælingar gefa til kynna þótt lægri mörk súrefnisupptöku séu notuð. Þetta bentir til að magn síldarinnar innan vegfyllingar sé breytilegt í tíma, líkt og bergmálmælingar sýna. Til þess að líkja eftir þessari hegðun með föstu magni þurfti því nokkuð lægra magn síldar sem náði að lýsa ákveðnu meðalástandi innan vegfyllingar. Þetta magn var svo háð því hver súrefnisupptakan var. Næmnigreining á þessum tveim samverkandi þáttum gaf magn síldar um 15 – 25 þúsund tonn og súrefnisupptöku um 0,09 – 0,12 ml $O_2/g_{fisk}/klst$ sem bar vel saman við mælingar og þóttu raunhæf.

Stuðning við þessi gildi er að finna í rannsókn á súrefnisupptökuhraða atlantshafs makrils og síldar þar sem súrefnisupptökuhraði var skoðaður fyrir ákveðna stærð fiska í stýrðu umhverfi. Upptökuhraði 255 – 310 mm langrar síldar í 9,3°C heitu vatni á sundi var metinn um 0,13 ml $O_2/g_{fisk}/klst$ (Johnstone o.fl., 1993). Önnur rannsókn á áhrif hita og sundhraða á súrefnis-upptökuhraða nefnir að aðferðarfræðin sem notuð var við mat á súrefnisupptökuhraða hjá Johnstone o.fl. leiði af sér vanmat á súrefnisstyrk og að 0,13 ml $O_2/g_{fisk}/klst$ væri sennilegast lægri mörk upptökuhraða síldar við eðlilegar aðstæður þar sem sundhraði, aðgengi að fæðu og hitastig getur haft mikil áhrif á upptökuhraða síldarinnar (Macy o.fl., 1999). Til þess að efri mörk súrefnisupptöku, 0,35 ml $O_2/g_{fisk}/klst$, myndu passa við mælingar þurfti um tvö- til þrefalt minna magn af síld sem var talið ólíklegra miðað við það magn sem bergmálmælingar sýndu.

Þessi gildi var hægt að nýta sem inntak í áframhaldandi líkangerð sem útgangspunkt til frekari kvörðunar. Einföldu meðaltalsreikningunum var einnig beitt á tímabil mælinganna þar sem engin síld er talin hafa verið til staðar til þess að fá mat á bakgrunnsgildi súrefnisupptöku fjarðarins, svo sem vegna upptöku annarra lífvera, rotnunar fisks frá því síldin drapst og upptöku í seti. Þar fengust aftur á móti mun hærri gildi á bakgrunnssúrefnisupptöku en líklegt er að sé til staðar í Kolgrafafirði, þótt áhrif síldardauðans í desember 2012 og febrúar 2013 hafi mögulega enn slæm áhrif á súrefnisbúskap fjarðarins og þar af leiðandi tiltölulega há súrefnisupptaka við botn. Tókst því ekki að fá líklegt mat á þessa breytni með þessum einföldu reikningum.

4.2. Straumlíkan af Breiðafirði

Vatnaskil unnu straumlíkan af Kolgrafafirði árið 2001 fyrir Vegagerðina í aðdraganda þverunarinnar (Vatnaskil, 2001). Líkaninu var beitt til að reikna rennsli, straumhraða og sjávarhæð fyrir mismunandi breiddir á virku vatnsopi þverunarinnar. Þetta líkan var tekið upp til stuðnings rannsóknarverkefnisins. Beiting þess með hliðsjón af fyrstu niðurstöðum vettvangsmælinga gaf til kynna að líkanið gat ekki endurspeglað þá flóknu mynd sem mælingar gáfu til kynna, sér í lagi við mynni ytri fjarðarins. Þetta benti til að ekki væri fullnægjandi að draga jaðar líkansins við mynni Kolgrafafjarðar til að líkja eftir þessu flókna straummynstri þótt góð reynsla hefði verið við nýtingu líkansins til mats á vatnsskiptum um virkt vatnsop þverunarinnar. Nýfengnar dýptarmælingar frá Sjósmælingum Íslands gáfu til kynna hversu breytilegt botndýpið er á þessum slóðum og er um miklar þrengingar að ræða á leið sjávar úr Breiðafirði í Kolgrafafjörð. Til fullnustu þeim markmiðum sem sett höfðu verið fram í rannsóknarverkefninu var því einboðið að færa þyrfti líkanjaðarinn út. Engin önnur leið reyndist raunhæf til þess en að færa jaðarinn í mynni Breiðafjarðar. Opni jaðar uppfærðs líkans nær því frá Öndverðarnesi á Snæfellsnesi í suðri að Bjargtöngum í norðri.

Við líkangerðina var notast eins og áður við forritið AquaSea sem þróað er og viðhaldið af Vatnaskilum. Forritinu er ætlað að leysa tvívíð straumfræðivandamál með grunnsævisjöfnum (*e. Shallow-water equations*) með bútaaðferð (*e. Finite-element method*) á þríhyrninga reiknineti (Vatnaskil, 1998).

Sjómælingar Íslands afhentu umfangsmikil og ítarleg dýptargögn af stærstum hluta Breiðafjarðar. Mælingar vantaði fyrir firði á norðaustanverðum Breiðafirði sem og í Hvammsfirði, Álftafirði og Hraunfirði. Þar sem sjómælingum var ábótavant var stuðst við sjókort nr. 42 að undanskildum Hvammsfirði þar sem notast var við sjókort nr. 172 (frá 1896), en sjókortum nr. 172 og 42 ber ekki saman um dýpi í Hvammsfirði, og í Hraunfirði þar sem notast var við sjókort nr. 426. Í brúaropi Kolgrafafjarðar, í Stykkishólshöfn, við Skipavík og í Ólafsvíkurhöfn var notast við ítarlegar dýptarmælingar frá Vegagerðinni. Dýptargrunnar eldri líkana Vatnaskila mætti nota til að bæta núverandi dýptargrunn (sjá kafla 3.6), ekki var talin ástæða til að sameina dýptargrunna þeirra líkana við núverandi líkan að sinni. Landhæðarmælingar af vegfyllingunni voru notaðar í Kolgrafafirði en aðrar strendur og landhæðir voru fengnar frá TK50 landgrunn Loftmynda ehf. upp að 20 m y.s. Dýptargrunn líkansins má sjá á Mynd 25. Mynd 26 sýnir dýptargrunn í Kolgrafafirði og þrengingar sem eru til staðar rétt utan Kolgrafafjarðar.

Til að skapa fullnægjandi skilyrði á líkanjaðrinum voru fengnar líkanniðurstöður sjávarhæðar úr sjávarfallalíkani Vegagerðarinnar. Líkanniðurstöður sjávarfallalíkans Vegagerðarinnar voru til á einnar klukkustunda upplausn, þessi tímaupplausn gaf ekki nægjanlegan góðan samanburð í líkaninu við mæld gögn í Kolgrafafirði sem safnað var á töluvert hærri tíðni. Jafnframt voru vandkvæði í útreikningum sjávarfallalíkans Vegagerðarinnar fyrir hluta tímabilsins sem minnkuðu áreiðanleika ákvörðunar jaðarskilyrða.

Beiting niðurstaðna sjávarfallalíkans Vegagerðarinnar leiddi hins vegar af sér þann möguleika að taka inn niðurstöður hnattræna sjávarfallalíkansins TOPEX/Poseidon Global Inverse Solution TPXO (hér eftir kallað TPXO), sem þróað er og viðhaldið af Oregon State University (G.D. Egbert og S.Y. Erofeeva, 2002). TPXO nýtir gagnasett sjávarfallapátta sem unnið er, með aðstoð líkans, frá gervihnattagögnum frá TOPEX/Poseidon, Jason-1, ERS og Topex Tandem gervihnöttum til að meta stöðu sjávarfalla, hægt er að velja um mismunandi inntaksgagnasett í TPXO en gagnasettin innihalda yfirleitt mismunandi fjölda gervihnatta sem notaðir eru við greiningu sjávarfallapáttanna.

Niðurstöður TPXO voru bornar saman við sjávarfallalíkan Vegagerðarinnar en sá samanburður var ráðandi fyrir val á inntaksgagnasetti fyrir TPXO. Það inntaksgagnasett sem gaf bestan samanburð við sjávarfallalíkan Vegagerðarinnar var TPXO-AO (Atlantic Ocean) sem er sérhæft gagnasett fyrir Atlantshafið sem nýtir alla fjóra gervihnetti við greiningu sjávarfallapáttanna og tekur tillit til eftirfarandi sjávarfallapátta: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, M4, MS4 og MN4. Sjávarfallapættir á lægri tíðnum, t.a.m. svarandi til hálfsmánaðar- og mánaðarsveiflna, Mf og Mm, eru ekki gefnir.

Vindsvið líkansins var byggt upp með gögnum frá veðurlíkani Veðurstofu Íslands, Harmonie, og vindmælingum í Kolgrafafirði þegar þær voru til. Mælingarnar voru láttnar stýra vindsviði Kolgrafafjarðar innan vegfyllingar þegar þær voru til. Vindsvið líkansins er á einnar klukkustunda upplausn og skiptist í 532 áhrifsvæði þar sem minnstu áhrifsvæðin eru um 200 m á kannt innan Kolgrafafjarðar en 2,5 – 15 km í Breiðafirði.

4.2.1. Aðlögun straumlíkans

Við aðlögun straumlíkansins var notast við tiltækar sjávarhæðar- og straummælingar á mismunandi stöðum í Breiðafirði. Keyra þurfti 6 tilvik til að ná yfir það tímabil sem mælingarnar ná yfir. Reiknaðar sjávarhæðir voru bornar saman við mælingar frá Þorskafirði, í Flatey, Stykkishólshöfn, við Brokey í

mynni Hvammsfjarðar, Búðardal, Ólafsvík og Kolgrafafirði fyrir mismunandi tímabil allt frá október 2007 til febrúar 2014 í 2 vikna lotum. Jafnframt voru reiknaðir straumar bornir saman við mældra strauma í Kolgrafafirði.

Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar var góður í öllum tilvikum að undanskildum Búðardal og Brokey. Við Brokey og Búðardal voru reiknuð sjávarföll í nokkuð góðu samræmi við mælingar í tíma en reiknað útslag sjávarhæðar var nokkuð lægra en mælingar sýna, jafnframt mátti sjá aðeins eðlismun á hegðun sjávarfalla við Brokey en þar er líklegast um mjög staðbundin áhrif að ræða. Þessi frávik má rekja til lágrar upplausnar á eyjum í mynni Hvammsfjarðar í líkaninu, sem valda aukinni tregðu fyrir sjávarföll um Hvammsfjörð, jafnframt mætti endurskoða ákvörðun dýptargrunns í Hvammsfirði í ljósi ósamræmis í sjókortum nr. 172 og 42.

Áberandi betri samanburð má sjá í Kolgrafafirði eins og við var búist vegna mun hærri upplausnar reiknins við Kolgrafafjörð. Þar er samanburður við H3 og H4 góður (sjá Mynd 29 og Mynd 30) en litla hliðrun í útslagi sjávarfalla má sjá í H1 og H2 (sjá Mynd 27 og Mynd 28). Þetta mætti rekja til þess að leiðréttu þurfti gögnin vegna vandkvæða sem finna má í upphafi mæligagna (sjá kafla 3.2.1). Mögulega þarf að ganga enn lengra við leiðréttingu mæligagnanna þar sem samanburður mælinga og reikninga á útslagi sjávarfallanna er almennt góður.

Mynd 31 - Mynd 34 sýnir samanburð á aflrófi (e. *power spectrum*) reiknaðra og mældra sjávarhæða við H1 – H4 fyrir 12 daga tímabil. Aflróf reikninga og mælinga er mjög svipaði á öllum tíðnum hærri en sem svarar u.þ.b. sólarhringsveiflu. Útslag heilsdagstunglsveiflna (e. *lunar diurnal*), O_1 og K_1 , og hálf dags-tunglsveiflna (e. *principal lunar semidurnal*), M_2 og K_2 , passar vel saman milli reikninga og mælinga í aflrófi á öllum mælistöðum. Mælingar allra sjávarhæðamælna sýna svörun, þó litla, við M_3 sem ekki kemur fram í reikningum en ekki er tekið tillit til M_3 á jaðri líkansins. Þáttur M_4 hefur mikla svörun í mælingum allra mælistaðanna sem líkanið vanmetur lítillega, en M_4 er hæsta tíðni sem tekin er inn við jaðar líkansins. Bæði reikningar og mælingar sýna svörun við M_6 en sá sjávarfallaþáttur er ekki tekinn inn við jaðar líkansins, líkanið virðist vanmeta M_6 við H4 en við H4 verður mun meiri svörun á M_6 og M_8 sjávarfallaþáttum en á öðrum mælistöðum í firðinum. Gjarnan er vísað til þessara þátta sem grunnsævisþátta sjávarfallanna (e. *shallow water overtides*) eða ólínulegra yfirsveiflna (e. *nonlinear harmonic constituents*).

Mynd 35 - Mynd 39 sýna samanburð mældra og reiknaðra straumhraðaþátta fyrir HFS, HNA, HSV, HFA og HFV. Straumsjárnar mæla straumhraða á 1 m bili upp eftir vatnssúlunni, og því var tekið meðaltal straumhraða yfir dýpið sem borið er saman við reiknaðan hraða. Straumhraði mældur á hverju dýptarbili fyrir sig er sýndur í gráskala litum í bakgrunni myndanna. Norður-suður þáttur strauma er merktur með V en austur-vestur þáttur er merktur U á myndunum. Reiknaðir straumar eru almennt sambærilegir því sem mælingar gefa til kynna, en þó með markverðum undantekningum. Merkjanlegustu frávikin virðast helst bera upp á stórstraumi, þegar stundum mælist verulega aukinn straumhraði sem reikningar endurspegla ekki. Þetta getur gerst óreglulega í sömu stórstraumslotu, þ.e. ekki á hverju sjávarfalli. Ekki liggja fyrir skýringar á þessari straumhegðun og því ekki hvort búast megi almennt við að reiknilíkanið geti líkt eftir. Þannig er ekki útilokað að mælitækin hafi ekki náð að taka nægjanlega tillit til veltings þeirra um lárétta ása og snúning um lóðrétta ás (sjá umfjöllun í 3.3). Engin stoð fæst heldur við þessum atburðum í öðrum mælingum, t.a.m. þrýstingsmælingum og súrefnismælingum MicroCAT mælna.

Önnur frávik milli mælinga og reikninga eru tiltölulega lítil og skýrast að nokkru marki af því að val samanburðarstaðar í líkaninu getur verið bundið einhverri óvissu. Þegar litið er til uppsetningar straumsjárlnanna (sjá kafla 3.3) með hliðsjón af færslum sem vitað er til að hafi verið á

straumlögnum HFS og HSV (sjá kafla 3.4) má auðveldlega sjá að samanburður reiknaðra og mældra strauma í nákvæmum hnitum upphaflegu staðsetningar mælanna er óraunhæf krafa. Ekki er að fullu vitað hvort aðrir mælar hafi hreyfst, en færsla mæla getur auðveldlega verið nokkur hundruð metrar án þess að færslan væri sjáanleg við endurheimtu mælanna, jafnframt myndi slík færsla ekki vera augljós í mælingum ef mæililagnir haldast á sambærilegu dýpi og færslan því ekki numin á þrýstimæli lagnarinnar. Næmnigreining á breytileika reiknaðra strauma var framkvæmd þar sem hnit viðmiðunarstaða mældra strauma var hnikað um 150 m til austurs, vesturs, norðurs og suðurs. Niðurstöður sýndu að töluverður breytileiki getur verið á straumhraða og –stefnu með þessari hníkun á öllum stöðvum, Mynd 40 sýnir dæmi um næmni á HNA en þar má sjá allt að 10 cm/s frávik í hraða við 150 m hníkun. Næmni viðmiðunarstaða mældra strauma má einnig sjá á Mynd 41 en þar hefur mælingum frá HNA og HSV (táknað með rauðum örvum) verið bætt við straumörvar líkanreikninga (táknað með svörtum örvum). Almennt ber reikningum og mælingum vel saman fyrir öll mælitímabil innan þessara marka sem óvissa í staðsetningu setur.

4.3. Vatnsgæðalíkan af Kolgrafafirði

Við hermun súrefnisbúskapar og –flutnings í Kolgrafafirði var stuðst við vatnsgæðalíkan úr hugbúnaðarsvítunni Delft3D sem þróað er og viðhaldið af Deltares (Deltares, 2014[1] og 2014[2]). Líkanið hefur að geyma yfirgripsmikinn gagnagrunn efna og efnaferla til vatnsgæða- og vistfræðilegrar hermunar, allt frá einföldum hlutlausum sporefnareikningum til flóknari kerfa svo sem súrefnisbúskap eða flóknari þörungabúskap. Vatnsgæðalíkanið má keyra ein-, tví- eða þrívítt eða sem sambland þessara þátta. Að sinni er líkanið keyrt tvívítt.

Vatnsgæðalíkanið byggir á straumlíkani sem rætt er um í kafla 4.1 en líkönin nýta sama dýptargrunn, vindsvið og jaðarskilyrði. Vatnsgæðalíkanið nýtir þó ekki sama reikninet og straumlíkanið. Líkaninu er því skipt upp í tvo hluta, þ.e. straumhluta og vatnsgæðahluta, sem nánar verður fjallað um í þessum kafla.

4.3.1. Straumhluti

Vatnsgæðalíkanið byggir flutning efna á niðurstöðum straumlíkanreikninga en slíka lausn má fá úr hvaða straumlíkani sem er að því gefnu að lausnin sé skrifuð á þann hátt sem vatnsgæðalíkanið skilur. Ekki var talin ástæða til að aðlaga straumlíkan Vatnaskila, AquaSea, að vatnsgæðalíkaninu að sinni og var því notast við innbyggðan straumhluta hugbúnaðarsvítunnar Delft3D, Delft3D-Flow. Delft3D-Flow er straumfræðilíkan sem gefur kost á að reikna straumfræðivandamál í tví- og þrívídd með grunnsævisjöfnum með mismunaaðferð (*e. finite-difference method*) í tvívíðu eða rúmmálsaðferð (*e. finite-volume method*) í þrívíðu rúmi á reglulegu neti (Deltares, 2014[1]). Hægt er að keyra vatnsgæðalíkanið samtvinnað (*e. coupled*) við straumhlutann, og má þannig láta vatnsgæði hafa áhrif á straumhegðun t.d. vegna seltu eða hitamismunar. Áhrif breytilegrar seltu og hita koma aðallega fram í breytileika straums í lóðréttu sniði ef lagskipting er nægjanleg. Þar sem líkanið var keyrt tvívítt við aðstæður þar sem breytileiki framangreindra þátta er lágur, er ekki reiknað með breytingum yfir dýpið og því var ekki talin ástæða til að keyra straum- og vatnsgæðahluta líkansins samtvinnaða að sinni.

4.3.2. Vatnsgæðahluti

Vatnsgæðahluti líkansins, D-Water Quality (eða DELWAQ), leysir svokallaða aðstreymis–sveimis–hvörfunar jöfnu (*e. advection–diffusion–reaction equation*) (Deltares, 2014[2]). Vatnsgæðahluti líkansins nýtir sama reikninet og straumfræðilausnin, sem gengur inn í líkanið, er reiknað á. Vatnsgæðalíkanið er uppsett fyrir útreikning súrefnisflutnings, -upptöku og -endurnýjun. Líkanið styðst

við hita- og seltugögn frá MicroCAT mælum til mats á súrefnismettun í stað þess að reikna út full orkuskipti. Þessi aðferð er farin til að minnka umfang uppsetningar, kvörðunar og útreikninga líkansins, og gefur góða raun.

Mat á bakgrunnssúrefnisupptöku

Í líkaninu af Kolgrafafirði er gert ráð fyrir að öll súrefnisupptaka, að undanskilinni súrefnisupptöku síldar, sé í seti við botn (*e. sediment oxygen demand, SOD*). Þessi nálgun er tekin þar sem ekki eru forsendur til að skipta bakgrunnssúrefnisupptöku upp í upptöku í seti og vegna annarra þátta í vatnsbolnum. Bakgrunnssúrefnisupptaka er metin með því að aðlaga reikninga að mældum súrefnisstyrk þegar síld er ekki til staðar í firðinum og ætla má að súrefnisframleiðsla frumframleiðanda í firðinum sé óveruleg. Stuðst var við tímabilið 1.10.2013 – 28.10.2013 til að mats á bakgrunnssúrefnisupptöku þar sem vitað var að síld var ekki til staðar fyrir 28. nóvember 2014.

Erfitt reyndist að hafa sama gildi innan og utan vegfyllingar sem gæfi góðan samanburð við mælingar í byrjun og undir lok október. Með því að setja lægri bakgrunnssúrefnisupptöku utan vegfyllingar en innan hennar fékkst betri samanburður við mælingar (sjá Mynd 42). Reyndist 1,8 g O₂/m²/d innan vegfyllingar og 1,0 g O₂/m²/d utan vegfyllingar gefa góðan samanburð við mæld gildi frá sama tíma.

Gert er ráð fyrir að bakgrunnssúrefnisupptaka sé föst í tíma þegar síld er í firðinum þar sem ekki er talin forsenda til að meta breytingar á bakgrunnssúrefnisupptöku með núverandi gögnum. Þess skal þó getið að nálgunina þyrfti að endurskoða ef reikna ætti súrefnisbúskap fjarðarins yfir sumartímam þegar frumframleiðendur eru til staðar. Þar sem bestur samanburður fæst með hærri styrk innan vegfyllingar en utan hennar, gæti það mögulega verið til marks um að enn hafi gætt áhrifa vegna síldardauðanna veturinn 2012-2013. Slíkt fæst þó ekki staðfest þar sem engin gögn eru til áður en þeir atburðir áttu sér stað til samanburðar.

Mat á súrefnisendurnýjun

Við yfirborð sjávar er súrefnisblöndun vegna vinds reiknuð, en innflæði súrefnis um yfirborð er stór þáttur í súrefnisbúskap fjarðarins. Súrefnisendurnýjun um yfirborð sjávar er reiknuð með innbyggðu ferli innan vatnsgæðalíkansins. Súrefnisendurnýjunin tekur inn hitastig og seltu sjávar til að meta mettnarstig súrefnis í sjónum sem síðar, ásamt vindhraða, er notað til að meta flæði súrefnis um yfirborð en flæði súrefnis um yfirborð eykst með lækandi mettnarstigi súrefnis í sjónum. Eins og áður kom fram eru hita- og seltugögn frá MicroCAT mælum notuð til mats á súrefnismettun í líkaninu. Þessi nálgun getur valdið smávægilegum skekkjum í mati á súrefnisinnflæði um yfirborð í Breiðafirði og í Kolgrafafirði utan vegfyllingar þar sem mælingar voru eingöngu framkvæmdar innan vegfyllingar. Þessar skekkjur eru taldar innan ásættanlegra marka til að svara þeim spurningum sem settar eru fram hér en munur á sjávarhita við mynni Kolgrafafjarðar og innan vegfyllingar getur verið um 1°C sem veldur um 2% skekkju á mettnarstyrk súrefnis í sjó.

Mat á dreifingu og magni síldar

Súrefnisupptaka síldar er skilgreind í vatnsboli líkansins með breytileika í tíma og rúmi. Þar sem ekki liggja fyllilega fyrir nákvæmar upplýsingar um súrefnisupptökuhraða, magn eða dreifingu síldar var reynt að beita einföldum reikningum til að minnka umfang í ákvörðunum við þessa þætti (sjá kafla 4.1). Notast var við súrefnisupptökuhraða frá þessum reikningum á meðalsúrefnisstyrk, 0,12 ml O₂/g_{fisk}/klst, en þeir gáfu jafnframt til kynna að ekki væri nægjanlegt að hafa magn síldar innan vegfyllingar óháð tíma.

Við mat á magni síldar var notast við súrefnismælingar frá MicroCAT mælum í Kolgrafafirði og stuðst við bergmálmælingar. Líkaninu var beitt án áhrifa síldarinnar og sú niðurstaða borin saman við súrefnismælingar á mæilögnum L1 og L2 í Kolgrafafirði. Mismunur mældra og reiknaðra gilda var álitin vera vísbending um magn síldar í firðinum, og var þá tímaseía fyrir magn síldar bakreiknuð frá þessum mismun. Jafnframt gaf þessi samanburður til kynna að síld kæmi inn í Kolgrafafjörð um 31. október 2013 en Hafrannsóknastofnun hafði metið þremur dögum áður að engin síld væri í firðinum. Magn síldar var uppfært á 12 klst fresti í líkaninu og var síldinni dreift á þrjú svæði innan Kolgrafafjarðar (sjá Mynd 43): tvö innan vegfyllingar og eitt utan hennar. Gert er ráð fyrir að síld utan Kolgrafafjarðar hafi óveruleg áhrif á súrefnisstyrk innan Kolgrafafjarðar. Bergmálmælingar frá 12. mars 2013 gefa til kynna að töluvert magn síldar hafi þá legið í vestanverðum Grundarfirði og er talið líklegt að áhrif þeirrar síldar á súrefnisbúskap Kolgrafafjarðar séu óveruleg. Ætla má að sama eigi við um síld annars staðar í Breiðafirði.

Síldarmagni var skipt upp milli svæðanna utan vegfyllingar og innan hennar í hlutfalli við lægstu og hæstu súrefnismælingar innan vegfyllingarinnar þ.a. með auknum mun milli hæsta og lægsta gildis súrefnismælinga jókst hlutfall síldar innan vegfyllingar. Síldarmagninu er dreift jafnt í rúmi innan þessara svæða þar sem ekki lágu fyrir nægilega góð gögn til mats á dreifingu síldarinnar innan vegfyllingarinnar. Fram að 1. febrúar 2014 eru svæðin innan vegfyllingar álitin vera sem eitt svæði með jafndreifða síld eftir rúmmáli. Með því skiptist magn síldar um 65% á norður svæðinu og 35% á suður svæðinu. Mælingar eftir 1. febrúar sýndu hins vegar að þessi dreifing væri ekki fullnægjandi á þeim tíma. Eftir 1. febrúar er því öll síld innan vegfyllingar álitin vera á norðursvæðinu.

Næmnigreining var framkvæmd á dreifingu síldar þar sem síld var jafndreifð eftir flatarmáli í stað rúmmáls, en slíka dreifing mætti túlka í tvívíðu líkani sem svo að síld væri eingöngu til staðar á ákveðnu dýptarbili en ekki dreifð yfir allt dýpið. Óverulegur munur var á niðurstöðum milli dreifinganna tveggja. Einnig var framkvæmd næmnigreining á dreifingu síldar milli svæðanna tveggja innan vegfyllingar og leiddi hún í ljós að töluvert næmni er fyrir dreifingu síldar milli svæðanna (lárétt dreifing).

Reiknað mat á dreifingu síldar innan og utan vegfyllingar sem og heildarmagni síldar má sjá á Mynd 44. Mat Hafrannsóknastofnunar á magni síldar með bergmálmælingum er sýnt á myndinni til samanburðar, og má sjá að reiknað mat á magni síldar er á svipaðri stærðargráðu og niðurstöður mælinga stofnunarinnar. Bergmálmælingar 28. nóvember 2013 og 12. mars 2014 gefa til kynna að um 15 til 40 þúsund tonn síldar hafi verið á ferðinni umfram það sem áætlað er í líkani, en mat síldar í líkani lendir saman við mat Hafrannsóknastofnunar frá 11. janúar 2014. Miðað við heildarmagn síldar sem gæti hafa verið á ferðinni þennan veturinn samkvæmt reiknuðu mati er óvíst að þetta geti talist verulegt misræmi. Ætla má þó að misræmið geti stafað af samlegðaráhrifum nokkurra þátta, þ.m.t. að óvissa er í ákvörðun á dreifingu síldar í líkaninu, bæði í tíma og rúmi, og mat á súrefnisupptökuhraða síldar getur verið ónákvæmt og hugsanlega er það breytilegt í tíma sem ekki eru forsendur til að taka tillit til í líkangerðinni. Einnig liggur ekki fyrir mat á óvissu í ákvörðun Hafrannsóknastofnunar á magni síldar.

4.3.3. Aðlögun vatnsgæðalíkans

Líkaniðurstöður straumhluta vatnsgæðalíkansins, líkt og fyrir straumlíkanið, voru bornar saman við mælingar. Eins og í straumlíkaninu mátti sjá góðan samanburð reikninga úr straumhluta vatnsgæðalíkansins við mæld gildi og niðurstöðum straumhluta vatnsgæðalíkansins og straumlíkansins ber mjög vel saman í sjávarhæðum eins og sjá má á Mynd 45.

Samanburður straumhlutans við straumlíkanið í tvívíðu plani, þar sem niðurstöður beggja er varpað á reglulegt 200 m net, sýnir hversu vel reikningar straumhluta vatnsgæðalíkansins endurspegla reikninga straumlíkansins (Mynd 46-Mynd 49). Straummynstur er mjög áþekkt og reiknaðir straumhraðar tiltölulega svipaðir almennt séð. Það er helst næst jöðrum sem einhvers lítilllegs munar gætir, en ætla má að það hafi óveruleg áhrif gagnvart efnaflutningsreikningum, þ.m.t. súrefnisreikningum, með vatnsgæðalíkaninu. Aukinn hraða má þó sjá í Hraunfirði í straumhluta vatnsgæðalíkansins samanborið við straumlíkanið. Þennan mun má rekja að einhverju marki til mismunandi upplausnar Hraunsfjarðar í reiknineti líkananna en upplausn fjarðarins er töluvert hærri í straumlíkaninu. Þá var rennsli um brúarop vegfyllingarinnar borið saman í líkönunum og var rennslið það sama í báðum tilfellum.

Samanburður var framkvæmdur á flutningi hlutlausra sporefna frá syðrihluta Kolgrafafjarðar í líkönunum og mátti sjá sambærilegan flutning efna frá syðri- til norðurhluta Kolgrafafjarðar innan vegfyllingar milli líkananna. Þó virðist straumhluti vatnsgæðalíkansins lítilllega vanmeta blöndun meðfram ströndu sem gæti verið afleiðing misræmis í straumhraðapætti, sbr. umræðu að ofan. Þetta vanmat er talið óverulegt í samanburði við aðra skekkjupætti í vatnsgæðahluta líkansins.

Mynd 50 sýnir samanburð mældra og reiknaðra sjávarhæða við H4. Breytileika má sjá í mælingum sem reikningar virðast ekki fyllilega ná. Ætla má að þetta komi að miklu leyti til vegna skorts á langtíma-sjávarfallapáttum í jaðarskilyrðum líkansins, en enginn sjávarfallapáttur er tekinn inn á jaðri sem hefur lægri tíðni en svarar til eins dags sjávarfallapáttar. Þetta ætti ekki að koma að sök við líkangerðina þar sem tryggt er að allir meginþættir sjávarfallanna (*e. primary constituents*) eru teknir inn á jaðri líkansins.

Niðurstöður úr vatnsgæðahluta líkansins voru bornar saman við tiltækar súrefnismælingar frá MicroCAT mælum sem og við sondumælingar sem falla innan líkantímans, en engar sýnatökumælingar voru tiltækar innan líkantímans. Eins og áður kom fram er líkanið ekki stillt af til að reikna súrefnisbúskap þegar frumframleiðendur eru til staðar í Kolgrafafirði. Líkanið var því eingöngu keyrt frá og með október 2013 til apríl 2014. Mynd 51 sýnir samanburð 12 klst meðaltala reiknaðs og mælds styrks uppleysts súrefnis á mæliögnum L1, L2 og L3. Reiknuðum styrk súrefnis ber mjög vel saman við mælingar á L1 og L2, sem að hluta til má rekja til þess hvernig magn síldar og dreifing hennar er stillt af með hliðsjón af samanburði mælinga og reikninga á súrefnisstyrk, sbr. umræðu að ofan. Reikningum og mælingum ber einnig vel saman á L3. Vegna færslu L3 á mælitímabilinu (sjá kafla 3.4) eru tvær línur sýndar fyrir reiknaðan súrefnisstyrk á L3 en þær tákna upphafsstaðsetningu og áætlaða lokastaðsetningu mælisins þar sem brotin lína táknar reiknaðan styrk á hvorum stað fyrir sig þegar mælirinn er á hreyfingu eða ekki á staðnum. Reikningum og mælingum ber vel saman í meðaltölum yfir 6 klst eða lengri tíma. Ef bornir eru saman reikningar og mælingar fyrir 3 klst eða styttri meðaltöl má sjá ágætan samanburð á L1, en L2 og L3 hafa mun minna útslag með sjávarföllum í reikningum en í mælingum. Líklegt er að upplausn síldarmagns í tíma og rúmi hafi þarna veruleg áhrif.

Mynd 52 sýnir samanburð 12 klst meðaltala reiknaðs og mælds styrks uppleysts súrefnis á súrefnis-mælum við straumsjár, HNA, HSV, HFA og HFV. Upphaflega nálgun á dreifingu síldar þar sem hún var jafndreifð í rúmi innan vegfyllingar og þannig magni síldar hlutfallslega skipt milli svæða (Mynd 43) 65% í norðurhluta og 35% í suðurhluta innan vegfyllingar, leiddi í ljós vanmat á súrefnisstyrk í HFA og HFV. Því var sú skipting ekki talin fullnægjandi fyrir allt reiknitímabilið. Eftir 1. febrúar var því allt magn síldar innan vegfyllingar fært í norðurhluta fjarðarins. Með þessari aðlögun fékkst góður samanburður reiknaðs og mælds súrefnisstyrks syðst í firðinum á 12 klst grunni.

Ef reiknaður súrefnisstyrkur er borinn saman við sondumælingar má almennt sjá nokkuð góðan samanburð við mæld gildi. Á líkantíma voru 14 sondumælingar teknar í tveimur leiðöngrum, annar var farinn 5. desember 2013 og hinn 28. janúar 2014. Einungis tvær mælingar voru utan vegfyllingar, báðar mælingarnar voru framkvæmdar 5. desember 2013 en þær mælingar gefa til kynna ofmat reiknaðs súrefnisstyrks utan vegfyllingar. Vegna fárra mælinga utan vegfyllingar er ekki hægt að leggja fyllilegt mat á nákvæmni reiknaðs styrks súrefnis utan vegfyllingar. Samanburður mælds og reiknaðs súrefnisstyrks innan vegfyllingar gefur til kynna að vatnsgæðalíkanið gefi gott mat á súrefnisbúskap innan vegfyllingar í 6 og 12 klst meðaltölum miðað við núverandi forsendur.

5. Umhverfisaðstæður og helstu áhrifavaldar óhagstæðra aðstæðna við síldargöngur

Í umfjölluninni að framan um gögn og líkangerð má ráða að breytileiki er töluverður í Kolgrafafirði í helstu áhrifaþáttum umhverfisaðstæðna, veðurfari, sjávarföllum, og vatnsgæðaþáttum. Bergmáls-mælingar Hafrannsóknastofnunar bæði innan og utan rannsóknartímabilsins og aðlögun vatnsgæðalíkansins að þeim mælingum sem safnað var í Kolgrafafirði gefa til kynna að síldargöngur í Kolgrafafirði eru bundnar við vetrarmánuði. Yfir rannsóknartímabilið fellur nokkurn veginn saman ætluð viðvera síldar í firðinum (Mynd 44) og hitastig sjávar um eða undir 4 °C (Mynd 65, Mynd 66), þ.e. u.þ.b. tímabilið frá byrjun nóvember til loka mars. Ekki er ljóst hvort hér sé um tilviljun að ræða að hitastigið hafi verið nokkurn veginn það sama þegar síldin gekk í fjörðinn og þegar hún fór. Hins vegar hefur komið fram hjá Hafrannsóknastofnun gagnvart síldargöngum í Grundarfirði að ástæða þess að síldin leiti inn í fjörðinn er sú að þar er heldur kaldari og ferskari sjór en fyrir utan. Síld heldur sig gjarnan í köldum sjó í vetursetu sinni, en þá dregur úr fæðuöflun hennar og hægir á líkamsstarfsemi (Hafrannsóknastofnun, 2007). Almennt er vetursetan talin vera u.þ.b. frá október til apríl, misjafnt milli svæða og ára (Guðmundur J. Óskarsson, 2012).

Greining umhverfisaðstæðna tekur fyrst og fremst mið af tímabili síldarganga til að ákvarða þær aðstæður sem ráða hvað mestu um mögulegan súrefnisskort í Kolgrafafirði við síldargöngur.

5.1. Sjávarföll

Breytileiki sjávarfalla í Kolgrafafirði helgast af styrk mismunandi sjávarfallapátta og samspili þeirra við grunnsævið í Breiðafirði og frekari grynningar og þrengingar þegar innar dregur í Kolgrafafirði. Mynd 50 sýnir sveiflu sjávarborðs við Eiðisstapa (H4) yfir 6 mánaða tímabil. Töluverður munur er í sveifluhæð sjávarfallanna á stórstraumi annars vegar og smástraumi hins vegar. Mesta útslag á stórstraumi yfir tímabilið er um -2,5 m til 2,5 m, eða um 5 m sveifla. Minnsta útslag er hins vegar um -1,8 m til 2 m, eða um 3,8 m sveifla. Mesta útslag á smástraumi er um -1 m til 1 m, eða um 2 m sveifla, en minnsta útslag á smástraumi er um -0,6 m til 0,6 m eða um 1,2 m sveifla. Eðli málsins samkvæmt verður því töluverður breytileiki í sjávarfallastraumum eftir því hvernig sveifla sjávarfallanna er.

Aflróf (e. *power spectrum*) mældrar sjávarhæðar í Ólafsvík (Mynd 53) gefur til kynna að meginþáttur sjávarfallanna, hálf dagsveiflan (M2 tilgreind á mynd, en getur einnig verið með aðra hálf dagsþætti, S2, N2, K2), hefur stærsta útslagið í aflrófinu, um tveimur stærðargráðum stærri en dagsveiflan (K1 tilgreind á mynd, en getur einnig verið með aðra heils dagsþætti, O1, P1). Aðrir merkjanlegir þættir eru mánaðar- og hálfmánaðarþættir Mm og Mf, sem greina breytingar milli smástraums og stórstraums, sem og ársþáttur Sa. Af hærri tíðnum sker 6 klst sveiflutími sig nokkuð úr (M4), en einnig

eru merkjanlegir þættir M3, M6 og M8. Gjarnan er vísað til þessara þátta sem grunnsævisþátta sjávarfallanna (*e. shallow water overtides*) eða ólínulegra yfirsveiflna (*e. nonlinear harmonic constituents*).

Aflróf fyrir mælda sjávarhæð í mynni Kolgrafafjarðar (H1) er mjög svipað rófinu fyrir Ólafsvík og virðist ámóta samspil vera milli sjávarfallanna og grunnsævisins á báðum stöðum. Hæstu tíðnir rófanna tveggja eru ekki samanburðarhæfar þar sem mælingarnar eru framkvæmdar á sitt hvorum tímagrunninum og misjafnt hvort og með hvaða hætti meðaltöl eru tekin við mælingarnar.

Þegar aflróf við mynni Kolgrafafjarðar (H1) og innan vegfyllingar við Eiðisstapa (H4) eru borin saman sést hvernig útslag við H4 eykst umtalsvert við hærri tíðnir, M4, M6 og M8, þ.e. svarandi við sveiflutíma 6 klst og lægri. Aflrófið á lægri tíðnum er svo til eins. Grunnsævisþættir sjávarfallanna eru þannig mun orkumeiri í innri Kolgrafafirði en í honum utanverðum. Af þessu má ráða að ekki einungis eiga sjávarföll og sjávarfallastraumar greiða leið frá Breiðafirði til innri Kolgrafafjarðar, heldur eykst orkan í sveiflupáttum með 6 klst sveiflutíma og minni, þ.e. við yfirsveiflur sjávarfallanna á grynningum.

Þótt útslag sjávarfallanna utan og innan Kolgrafafjarðar sé sambærilegt, er fasamunur til staðar. Greining sjávarhæðarmælinga leiddi í ljós um 23 mínútna fasamun á sjávarföllum milli H4 og H1 (Mynd 54), aðrir sjávarhæðarmælar voru mun nær H1 í fasa.

5.2. Sjávarstraumar

Útslög á sambærilegum tíðnum og fyrir mældar sjávarhæðir sjást í aflrófum mælds straumhraða. Mynd 55-Mynd 59 sýna aflróf meðalstraumhraða yfir dýpi brotið upp í snúningsþætti fyrir hvern mælistaðanna HNA, HFS, HSV, HFV og HFA. Snúningsþáttur segir til um hvort breyting í stefnu straums fari fram réttisælis eða rangsælis. Mynd 60 dregur síðan saman heildarróf frá öllum mælistöðum, þar sem róf réttisælis og rangsælis þátta eru lögð saman. Aflróf fyrir HSV liggur hæst á svo gott sem öllum tíðnum, en straumur þar mælist áberandi hæstur. Þá fylgir á eftir HFS. Rófið á HNA er heldur lægra nema á tíðnum svarandi til grunnsævisþáttanna M4, M6 og M8. Útslag þessara grunnsævisþátta er öllu minna á HFA og enn lægra á HFV, þó svo útslag svarandi til M2 nálgist það sem sjá má á HNA. Þessar yfirsveiflur sjávarfallanna sem mælast töluvert orkumeiri í H4 en H1 (Mynd 53) virðast örva strauma heldur minna innarlega í innri firði en nær megindýpi hans.

Nokkur munur getur verið milli mælistöðva varðandi það hvort annar hvor snúningsþáttur aflrófs sé meira ráðandi en hinn, og hvor þeirra það þá er á mismunandi tíðnum rófsins. Þannig hefur meginþáttur sjávarfallanna, hálfsvagsveiflan (M2), fyrir HNA (Mynd 55) ráðandi réttisælis þátt þótt rangsælis þátturinn sé vel merkjanlegur. Reikna má því með að stærrí hluta tímans, þá væntanlega bæði á aðfalli og útfalli fer breyting straumstefnu fram með réttisælis snúningi. Rangisælis snúningur er þó ráðandi á hærri tíðnum. Á lægri tíðnum eru þættirnir nokkuð jafnir að undanskilum hálfsmánaðar- og mánaðarþáttunum Mf og Mm, þar sem annars vegar er það rangsælisþáttur og hins vegar réttisælisþáttur sem er ráðandi. Má ætla að þetta endurspegli að nokkur munur getur verið í straumhegðun á þessum stað eftir því hvort stórstreymt sé eða smástreymt, og jafnvel nokkur breytileiki milli stór- og smástrauma.

Aflrófið fyrir HFS (Mynd 56) sýnir að rangsælisþáttur er ráðandi í hálfsvagsveiflu (M2) og hærri tíðnum, en hálfsmánaðarsveiflan (Mf) gefur til kynna að straumstefnubreytingar fari almennt fram með réttisælis snúningi öfugt við HNA. Fyrir mælistöð HSV (Mynd 57) eru snúningsþættir nokkuð jafnir fyrir tíðnir milli Mf og M2, en réttisælis snúningur meira ráðandi fyrir hærri tíðnir. Ekki ósvipaða sögu er af aflrófum HFV (Mynd 58) og HFA (Mynd 59) að segja þótt aflið þar sé mun minna en á hinum stöðvunum.

Af tiltölulega háu útslagi aflrófa á mælistöðunum á hálfsmánaðar til mánaðartíðnum og breytileika milli staða um hvort og þá hvaða snúningsþáttur er meira ráðandi, má ráða að um verulegan breytileika er að ræða í sjávarfallastraumum milli stórstraums og smástraums sem og milli mismunandi stórstrauma annars vegar og mismunandi smástrauma hins vegar.

Í greiningunni að ofan er ekki unnt að skilja frá þá háu straumhraða sem mældust oft á tíðum í straum-sjánum í takti við snúning mælitækja um ása sína (sjá kafla 3.3). Ekki liggur því fyrir hvort eða með hvaða hætti niðurstöður eru háðar slíkum atburðum. Ætla má þó að stóra myndin um innbyrðis samanburð milli mælistaða haldi.

Framangreind greining fær frekari stuðning með því að rýna í reiknaðar straumörvar í firðinum. Dæmi um straumhegðun fjarðarins á stórstraumi er sýnd á Mynd 61-Mynd 64, þar sem reiknaðar straumörvar í Kolgrafafirði á útfalli, liggjanda á fjöru, aðfalli og liggjanda á flóði, hafa verið lagðar ofan á dýptargrunn fjarðarins. Viðauki D inniheldur síðan niðurstöður reiknaðrar straumhegðunar í Kolgrafafirði fyrir útfall, liggjanda á fjöru, aðfall og liggjanda á flóði fyrir tvo aðliggjandi stór- og smástrauma í janúar og febrúar 2014. Reikningarnir koma frá straumhluta vatnsgæðalíkansins og gefa innsýn í hversu breytileg straumhegðun fjarðarins getur verið.

Straumhegðun er ekki einungis flókin í innri firði eins og framangreind greining á straummælingum þar gefur til kynna, heldur má einnig ráða frá líkanreikningum að straumhegðun er frekar flókin alls staðar í Kolgrafafirði og utan mynni hans. Þrengingar og grynningar sem eru til staðar í mynni fjarðarins og rétt utan hans ráða miklu um þessa hegðun. Við mynni fjarðarins má sjá hvernig straumstefna sjávar er til norðausturs á útfalli en tekur svo skarpa beygju til vesturs (Mynd 61). Sambærilega hegðun má sjá á aðfalli þar sem stefna strauma rétt utan við grynningar utan mynni Kolgrafafjarðar er til austurs en grynningar beina straumi til suðausturs og mynni og lögur fjarðarins beinir straumi til suðvesturs (Mynd 63). Í báðum tilfellum er meginþungi straumsins austan til í mynni fjarðarins, þar sem grynningar teygja sig frá vesturströnd til miðbiks mynnisins, auk þess sem grynningar og sker setja mark sitt á straumhegðunina rétt utan austurhluta mynnisins.

Margvísleg straumskil eru greinanleg í ytri firði yfir sjávarfallasveifluna með flóknu samspili inn og útstreymis um mynni fjarðarins, skiptingu milli innri Kolgrafafjarðar og Hraunsfjarðar og breytileika dýpisins. Þar virðast grynningarnar út af Berserkseyrarodda ráða töluverðu.

Líkt og greiningin að framan á aflrófum straummælinganna gaf til kynna, þá má sjá straumhegðun innan vegfyllingar sem er breytileg eftir stöðu sjávarfalla. Þannig er straumhegðun ekki eingöngu mismunandi á stór- og smástraumi heldur er hún einnig mismunandi milli stór- og smástrauma með mismunandi útslag (sjá Viðauka D).

Á miklum stórstraumi (þ.e. þegar útslag sjávarfalla er með mesta móti) má sjá á útfalli syðst í firðinum að meginstraumur liggur um miðbik fjarðarins til norðurs og fylgir svo að mestu leyti mesta dýpi fjarðarins að brúaropi (mynd D.5, vinstri hluti, með vegfyllingu). Syðst fylgja straumar ströndum til suðurs og eru ílangar hringiður sem taka upp stefnubreytinguna tiltölulega nálægt ströndu beggja vegna. Aðliggjandi meginstraumnum er stór rangsælis hringiða vestan til í firðinum neðan við Eiði. Þungi straumsins út um vatnsop vegfyllingarinnar liggur í meginþýpinu vestast í ytri firði og út um mynni fjarðarins, veikan bakstraumur má sjá næst ströndu. Á liggjandanum á fjörunni á eftir viðhelst mjög áþekkt straummynstur í innri firði, með mun lægri en þó vel merkjanlegum straumhraða um allan innri fjörð (mynd D.6, vinstri hluti, með vegfyllingu). Í ytri firði myndast réttisælis hringiða í firðinum austan til.

Á aðfalli við mikinn stórstraum (mynd D.7, vinstri hluti, með vegfyllingu) liggur mjög sterkur straumur frá mynni fjarðarinn um ytri fjörðinn annarsvegar að brúaropi og hinsvegar að Hraunfirði. Í innri firði liggur sterkur straumur meðfram ströndu í vesturhluta fjarðarinn, og berst í austur framhá Eiðisstapa. Við tangann skiptist straumurinn, að hluta gengur hann í suðurátt eftir vesturströnd syðsta hluta fjarðarinn, en hinn hlutinn berst allt að austurströnd fjarðarinn nokkuð suður af Kolgröfum. Þar skiptist straumurinn í norður og suður áttir meðfram austurströndinni. Straumurinn sem gengur norður við austurströndina sunnan Kolgrafa verður hluti af straumsterkri rangsælis hringiðu í mesta dýpi fjarðarinn, austan við meginstrauminn um brúaropið. Á liggjandanum á flóðinu á eftir (mynd D.8, vinstri hluti, með vegfyllingu) ber straumhegðun keim af sama ástandi á aðfalli í innri firði, en straumhraða í rénun. Skýr réttisælis hringiða er þó komin syðst í innri fjörðinn. Í ytri firði virðist skriðþungi aðfallsins mynda réttisælis hringiðu í firðinum.

Á minni stórstraumi á útfalli (mynd D.13, vinstri hluti, með vegfyllingu) liggur meginstraumur í átt að brúaropi um mesta dýpi fjarðarinn líkt og þegar stórstraumur er meiri, sbr. hér að framan. Straumar til suðurs í syðrihluta innri fjarðar eru ekki sjáanlegir og er stefnan nokkuð einsleitt til norðurs. Rangisælis iða myndast þar sem dýpi er mest í innri firði, en vestan við hana út af Eiði er veikari réttisælis hringiða og önnur mun minni réttisælis iða er síðan við austurströndina rétt sunnan við Kolgrafir. Straumhegðun í ytri firði er áþekk á stórstraumunum tveimur, en straumhraði er töluvert lægri á minni stórstraumi. Á liggjandanum á fjörunni á eftir er straumur ekki mjög afgerandi syðst í firðinum, en við meginþýpi innri fjarðar er hins vegar afgerandi réttisælis hringiða sem virðist teygja sig langleiðina milli vestur- og austurstrandar. Við austurströndina er þó merkjanlegur suðurstraumur (mynd D.14, vinstri hluti, með vegfyllingu).

Á aðfallinu á eftir (mynd D.15, vinstri hluti, með vegfyllingu) er hegðun sambærileg og fyrir stærri stórstrauma, sbr. umfjöllun að framan, en þó er straumhraði í firðinum töluvert minni og hegðun í syðsta hluta innri fjarðar er mun einfaldari með nær einsleitum suðlægum straum. Á liggjandanum á eftir á flóði viðhelst rangisælis hringiðan við meginþýpi innri fjarðar en syðst er veikur rangisælis straumur (mynd D.16, vinstri hluti, með vegfyllingu).

Á smástraumi er einnig munur eftir útslagi sjávarfallanna (myndir D.1-D.4 og D.9-D.12, vinstri hluti, með vegfyllingu). Á útfalli þegar útslag smástraumsins er mikið (mynd D.1) liggja norðlægir straumar frá suðurhluta fjarðarinn yfir mesta dýpi fjarðarinn og að austurströnd. Þegar útslag er minna (mynd D.9) er til staðar rangisælis hringiða í suðurhluta fjarðar og er megin útfallið nær austurströnd. Í báðum tilvikum myndast rangisælis hringiða í vestari hluta fjarðarinn við Eiðisstapa. Þegar útslag sjávarfallanna er meira má sjá hringiðuna liggja í meira dýpi með minni réttisælis hringiðu vestan við sig, við Eiði. Þegar útslag er minna hins vegar verður iðan stærri og færast að ströndu í vestri. Syðst í firðinum má sjá nokkuð einsleita strauma til norðurs þegar útslag er mikið (mynd D.1), en straumhegðun þar breytist töluvert við minna útslag (mynd D.9). Þá stefna straumar meðfram vesturströnd syðri hluta innri fjarðar til suðurs og rangisælis iða myndast. Straumur er eftir sem áður norðlægur meðfram austurströndinni. Í ytri firði eru straumar áþekkir milli smástraumanna en litlu lægri straumhraði þegar útslag er minna. Rétt utan við mynni fjarðarinn, vestan til, myndast lítil rangisælis hringiða þegar útslag smástraumsins er minna. Á liggjandanum á fjöru viðhelst straummynstur útfallsins að mestu í innri firði þegar útslagið er lítið (mynd D.10) með lítillaga dempuðum straumhraða. Þegar útslagið er mikið hins vegar (mynd D.2) fellur straumhraði verulega syðst í firðinum með mjög veikan rangisælis straum meðfram ströndu, en réttisælis iðan við meginþýpi innri fjarðar er enn tiltölulega sterk og stækkar svæði sitt að vesturströndinni.

Á aðfalli við smástraum með meira útslag (mynd D.3) má sjá töluvert sterkari straum meðfram vesturströnd ytri fjarðar samanborið við smástraum með minna útslag. Afgerandi sunnan straum má

sjá frá brúaropi inn eftir firðinum alveg frá vesturströnd að megindýpi fjarðarins og yfir allan suðurhluta hans. Tiltölulega lítil rangsælis hringiða myndast rétt austan megin við mesta dýpi fjarðarins og er straumur norðlægur þaðan að austurströnd. Við Eiðisstapa liggja straumar inn í syðri hluta fjarðarins og eru straumar nokkuð einsleitir til suðurs. Þegar útslag er minna (mynd D.11) má sjá flóknari straumhegðun bæði í mesta dýpi fjarðarins og syðst. Í suðurhluta fjarðarins er tiltölulega flókin, veik hringiðumyndun sem í megindráttum er rangsælis. Þó er straumur töluvert sterkari og meira afgerandi við vesturströndina. Utar í innri firðinum má sjá hvernig straumur frá brúaropi er að hluta brotinn upp um leið og hann kemur í meira dýpi. Veik rangsælis hringiða myndast í miðjum firðinum. Á liggjandanum á flóði viðhelst straumhegðun að mestu í innri firði með lítillaga dempuðum hraða þegar útslag er lítið (mynd D.12), en þegar útslag er mikið (mynd D.4) fellur straumhraði að mestu í suðurhluta fjarðarins en nokkuð sterk réttsælis iða viðhelst utar, við megindýpi innri fjarðar.

5.3. Sjávarhiti

Mynd 65 sýnir dagleg meðaltöl yfirborðshita í Kolgrafafirði. Árstíðabundin sveifla spannar um 12 °C. Hitanemar innan vegfyllingar í Kolgrafafirði sýna almennt lægri yfirborðshita yfir veturinn og hærri yfirborðshita yfir sumarið samanborið við mæla utan vegfyllingar. Eins og fram kom að framan leitar síldin í kaldari og ferskari sjó fyrir vetursetu sína og samkvæmt yfirborðsmælunum er hitastig allt að 1 °C lægra innst í firðinum samanborið við yst í honum. Svo virðist sem síldargöngur í Kolgrafafirði á rannsóknartímabilinu eiga sér stað þegar hitastig í firðinum er um eða undir 4 °C.

Mynd 66 sýnir síðan mælt hitastig á völdum stöðum í vatnsboli innri fjarðar samanborið við mælt yfirborðshitastig yst og innst í firðinum. Hitastig í vatnsboli innri fjarðar liggur að jafnaði á milli yfirborðshitastigs yst og innst í firðinum en virðist ekki togast í öfgar yfirborðshitastigs innst í firðinum, hvort sem er að sumri eða vetri. Leiða má að því líkum að virkur flutningur sjávarfalla um fjörðinn og trygg vatnsskipti tempri hitastigið og færi hitastig innri fjarðar nær hitastigi Breiðafjarðar. Að öðrum kosti mætti búast við meira langvararandi hitaáhrifum að sumri og kælingaráhrifum að vetri í takti við yfirborðshitastig innri fjarðar.

Sjávarhitastig hefur með beinum hætti áhrif á súrefnisbúskap fjarðarins við síldargöngur, þar sem mettunarstyrkur súrefnis er háður hitastigi.

5.4. Breytileiki súrefnisstyrks í innri firði

Áhrif sjávarfallanna á mæld gildi súrefnis, seltu og eðlisþyngd sjávar sjást m.a. sem regluleg en misstór útslög með um 12 klst sveiflutíma (sjá Viðauka B). Sjá má frekari vísbendingu um þátt sjávarfallanna í aflrófi súrefnismælinga. Mynd 67 sýnir slík róf fyrir súrefnismælingar á straumsjárölögnum. Þótt útslög rófa eru merkjanleg eru þau ekki eins greinanleg og aflróf sjávarhæða og sjávarstrauma, og eru ekki mikið hærri en meðalaflið á nærliggjandi tíðni. Ætla má að þetta komi að miklu leyti til af því hversu flókið samspil upptöku og endurnýjunar súrefnis er í súrefnishag fjarðarins, sér í lagi við síldargöngur. Nánar er vikið að þessu hér að neðan.

Almennt séð flyst vatn frá ytri firði í innri fjörð á aðfalli með hærri súrefnisstyrk en það vatn sem til staðar er í innri firði. Útslögin virðast hærri eftir því sem grunnstyrkurinn er lægri og vænta má að hærri súrefnisupptaka sé í innri firði sem leiðir til hraðara falls í súrefnisstyrk en ella. Til þess að aðgreina útslögin á sveiflutíma sjávarfallanna og til frekari skoðunar á lágtíðni grunnstyrk súrefnisins, þá var tveimur síum beitt á tímaraðirnar. Annars vegar var lágheypisú (e. *low-pass filter*) beitt á tímaraðirnar, þar sem sveiflum með sveiflutíma minni en um 28 klst var hleypt í gegnum síuna, sjá Mynd 68. Með þessu fékkst greinanlegra mat á breytingum í súrefnisstyrk á lengri tímaskala (lægri

tíðni) en svarar til sjávarfallasveiflunnar. Hins vegar var beitt háhleypisíu (*e. high-pass filter*) þar sem 11 klst sveiflum í súrefnisstyrk og hærri var hleypt í gegnum síuna. Með þessu var unnt að greina betur þann breytileika sem verður í súrefnisstyrk innan sveiflutíma sjávarfallanna.

Þessum aðferðum var meðal annarra beitt á gögn úr mæli L3n til þess að greina frekar útslög í súrefnisstyrk, sjá Mynd 69. Þar sést hvernig útslög á mældum súrefnisstyrk innan sjávarfallasveiflanna eru mun stærri þegar súrefnisstyrkur samanber lágheypisíaðar mælingar er lágur. Stærsta sveiflan í súrefnisstyrk innan sjávarfallasveiflna er um 1,5 ml/l fyrir þennan mæli. Breytingar í súrefnisstyrk út frá lágheypisíuðum mælingum eru aftur á móti töluvert meiri yfir mælitímabilið, eða ríflega 3 ml/l, með lægsta gildi í rúmum 4 ml/l en hæsta gildi í tæplega 7,5 ml/l. Ætla má að þessi mikli munur í há- og lággildum í lágheypisíuðum mælingum hafi veruleg áhrif í greiningu á þætti sjávarfallanna í aflrófunum, sbr. umfjöllun að framan. Stærstu lággildissveiflunnar í lágheypisíuðum mælingunum virðast falla mikið til saman við smástraum, en erfitt er að greina það sérstaklega þegar súrefnisstyrkur er hærri. Lágheypisíun við enn lægri tíðnir leiddi betur í ljós að lægstu gildin virðast koma fyrir á smástraumi. Nokkuð aukið afl er á tíðnum svarandi við mánaðarsveiflu (Mynd 67) sem styður við að breytileiki sé í súrefnisstyrk eftir því hvort smástreymt er eða stórstreymt.

Á Mynd 70 má sjá samanburð á mældum súrefnisstyrk allra mælitækja L1, L2 og L3. Heilt yfir, á þessum skala, eru svipaðar mælingar á súrefnisstyrk yfir mælitímabilið milli L1e, L1n, L2e og L2n. Þó er súrefnisstyrkur á L2 almennt heldur lægri en á L1. Mæling á L3 sker sig aftur á móti nokkuð úr fram til 5. desember 2013 þar sem súrefnisstyrkur er merkjanlega lægri en á L1 og L2 og nokkur munur er í mældum styrk eftir dýpi mælitækis. Fram að byrjun október er vel greinanlegur munur á mælingum milli mælitækja á L3. Þá er neðsti mælirinn L3n almennt að mæla minnsta styrkinn en efsti mælirinn L3e hærri styrk og L3m með styrk þar á milli. Er dæmi um atburð þar sem neðsti mælirinn sýnir súrefnisstyrk allt niður í 2 ml/l á meðan efsti mælirinn mælir um 5 ml/l. Þetta gefur til kynna minnkandi súrefnisstyrk eftir dýpi yfir tímabilið á þessu svæði. Þegar líður á október minnkar þessi munur og súrefnisstyrkur verður einsleitari með dýpi en þó merkjanlega lægri en á L1 og L2.

Lögn L3 færast síðan úr stað 5. desember 2013 að öllum líkindum norðar í fjörðinn eins og greina mátti á þrýstingsmælingum og var fjallað um í kafla 3.4. Sú færsla er einnig mjög greinileg í súrefnis-mælingunum, sjá Mynd 70. Eftir 5. desember er nánast enginn merkanlegur munur á milli mælitækja L3 á þessum skala og falla mælingarnar mun betur saman við L1 og L2. Svæðisbundinn munur í súrefnisstyrk er greinilegur í firðinum með almennt lægri styrk sunnar í firðinum þar sem L3 var upprunalega staðsett og hærri og almennt svipaðri styrk utar í firðinum þar sem allar lagnirnar L1, L2 og L3 voru eftir færslu L3.

Sveiflur í súrefnisstyrk á lægri tíðni en svarar til sveiflna sjávarfallanna, eru breytingar sem ætla má að séu að mestu vegna súrefnisupptöku lífvera og súrefniskrefjandi ferla, sem og breytileika í endurnýjun súrefnis. Til þess að skoða þær breytingar nánar voru mælingar á súrefnisstyrk, hitastigi og seltu fyrir alla mælanna lágheypisíaðar, og sveiflur í súrefnisstyrk vegna sjávarfalla þannig síaðar burt, sjá Mynd 71. Þar má sjá að fyrstu mælarnir sem fóru út, HFS og HNA, eru með nokkuð sambærileg gildi á mældu súrefni til að byrja með en svo koma atburðir þar sem HFS mælir nokkuð minni súrefnisstyrk. Á mælitímabili t0 á Mynd 71 fellur súrefnisstyrkur á HFS og HNA úr um 7 ml/l niður í um 5 ml/l. Í ljósi þess að hitastig fór hækkandi á tímabilinu, úr u.þ.b. 5 °C í 12 °C, er fallið heldur minna ef tekið er mið af mettnarstyrk sem er 7,1 ml/l við 5 °C og 6,1 ml/l við 12 °C.

Við upphaf tímabils t1 voru lagnir L1, L2, L3 og HSV settar út. Frá þeim tíma og þar til í byrjun september sýna L1, L2, HNA og HSV svipaðar mælingar, en nokkur munur er á mælistað L3 sem og milli mælanna á L3. Þar sýnir neðsti mælir L3 nokkuð lægri súrefnisstyrk. Frá um miðjum september er mjög lítil

breyting á milli mælistaða og sveiflast styrkur frá um 5 – 6,5 ml/l. Í upphafi mælitímabils t2 sýnir L3 aftur lægri gildi og stærri sveiflur í mældum súrefnisstyrk eru greinanlegar á öllum mælum þar sem meðalsúrefnisstyrkur er að falla. Lægsti meðalsúrefnisstyrkur á sér stað í lok janúar en 28. janúar eru HFV og HFA teknir í notkun og mæla þeir strax í upphafi lágan súrefnisstyrk og nokkuð minni styrk en hinir mælarnir, minnst um 2,5 ml/l í síuðu mælingunum. Frá um 7. til 12. apríl, við lok mælitímabils t2, er svo atburður þar sem L1 hækkar í um 7 ml/l á meðan allir aðrir mælar mæla fall í súrefnisstyrk mest niður í rúmlega 4 ml/l.

Engin síld var til staðar í lok október samanber bergmálmælingar Hafrannsóknastofnunar. Í lok nóvember var hins vegar staðfest að síld væri til staðar og metið að um 50 þúsund tonn væru innan vegfyllingar. Eins og kom fram við sannreynslu og kvörðun vatnsgæðalíkansins, þá má ætla að síldin hafi verið að koma smám saman inn í nóvember. Byrjun nóvember, er upphaf mælitímabils t2 (Mynd 71), en þá mælist nokkuð minni styrkur í L3 og sveiflur í súrefnisstyrk og milli mæla aukast töluvert og greina má fall frá þeim tíma sem nær lágmarki í lok janúar og hækkar aftur til loka mælinga.

5.5. Dreifing súrefnis í firðinum og flutningur um brúarop

Ef reiknaður súrefnisstyrkur er skoðaður í plani má sjá að á útfalli fer súrefnissnauðari sjór úr innri firði og færast meðfram vesturströnd fjarðarins utan vegfyllingar (sjá Mynd 72). Á liggjanda á fjöru má sjá að súrefnissnauðari sjór blandast að einhverju marki við súrefnisríkari sjó utan vegfyllingar en áberandi er hversu stórt svæðið í vesturhluta ytri fjarðar er þar sem sambærilegan súrefnisstyrk er að finna og í innri firði (sjá Mynd 73). Á aðfalli sést að sjór frá lágildissvæði ytri fjarðar skilar sér aftur inn í innri fjörð um vatnsop vegfyllingar (sjá Mynd 74) og blandast þar við sjó fyrir innan vegfyllinguna (sjá Mynd 75).

Styrkur súrefnis í vesturhluta ytri fjarðar breytist mjög mikið yfir keyrslutímam, auk þess sem stærð og lögun slíks svæðis í vesturhlutanum, sem sker sig nokkuð frá restinni af ytri firði gagnvart reiknuðum súrefnisstyrk, er mjög breytileg og er til staðar að einhverju marki yfir allan keyrslutímam. Til þægindaauka og framdráttar þeirri greiningu mælinga og líkanniðurstaðna sem á eftir kemur er vísað í þetta svæði í vesturhluta ytri fjarðar sem lágsúrefnissvæði, og á það einnig við þótt súrefnisstyrkur sé þar ekkert sérstaklega lágur en þó lægri en almennt gerist í ytri firði.

Sem dæmi má sjá aðra lögun lágsúrefnissvæðisins á stórstraumi á Mynd 76, og töluvert minna lágsúrefnissvæði á Mynd 77. Vegna lögunar og minni stærðar lágsúrefnissvæðisins kemst súrefnisríkari sjór að brúaropi sem veldur innskoti enn súrefnisríkari sjávar um brúarop.

Innan vegfyllingar má sjá áberandi lægri súrefnisstyrk syðst í firðinum, sér í lagi við austurströnd fjarðarins, þegar síldin er látin dvelja í líkaninu á syðra dreifingarsvæði innri fjarðar (Mynd 43). Þetta á við líkanniðurstöður fyrir 1. febrúar 2014. Svæði með lægri súrefnisstyrk teygir sig þá upp með austurströnd fjarðarins innan vegfyllingar en þessi hegðun fylgir þeirri straumhegðun sem sjá má innan vegfyllingar. Þegar síldin er ekki látin dvelja í líkaninu á syðra dreifingarsvæði innri fjarðar fer það eftir stærð lágsúrefnissvæðis ytri fjarðar og hvort súrefnisríkari sjór eigi greiðari leið inn í innri fjörð ef lágsúrefnissvæðið minnkar (Mynd 77), hvort lægsti styrkur innri fjarðar sé syðst í honum (Mynd 77) eða norðarlega (Mynd 76).

Mynd 78 sýnir 12 klst meðalsúrefnisstyrk á þremur stöðum innan vegfyllingar til samanburðar við 12 klst meðalsúrefnisstyrk innan vegfyllingar. Sjá má að súrefnisstyrkur syðst í firðinum er alltaf lægstur fram að 1. febrúar 2014 en eftir 1. febrúar er síldardreifingu breytt í líkaninu eins og kemur fram að ofan og rætt er frekar um í kafla 4.3.2. Síldinni er þá einungis dreift á nyrðra svæðinu (Mynd 43), þ.e. við megindýpi innri fjarðar. Við það að álagið hverfi innst í firðinum stígur súrefnisstyrkur þar aðeins.

5.6. Áhrif sveiflu sjávarfalla og vindafars á lágsúrefnissvæði ytri fjarðar

Mynd 79 sýnir samanburð tímaraða súrefnisstyrks reiknaðan á fjórum stöðum í Kolgrafafirði. Tveir eru innan vegfyllingar, annar innanlega, hinn nærri miðju dýpsta hlutans. Þriðji punkturinn er vestarlega í ytri firði þar sem lágsúrefnissvæðið myndast og fjórði punkturinn er austar í ytri firði þar sem frekar hátt súrefnisstig virðist ríkja. Sveiflur í súrefnisstyrk á lágsúrefnissvæðinu í vesturhluta ytri fjarðar fylgja að mestu sveiflum í innri firði (Mynd 79). Súrefnisstyrkur fellur því meir sem súrefnisupptaka vegna síldar er meiri, endurnýjun súrefnis um yfirborð er minni og sveifla sjávarfalla er minni. Súrefnisstyrkur í austurhluta ytri fjarðar liggur hins vegar mun hærra með mun stöðugri lágtíðnisveiflur en súrefnisstyrkur í vesturhlutanum. Mun meiri sveiflur eru hins vegar á hærri tíðnum sem endurspeglar vel innflæði súrefnisríks sjávar úr Breiðafirði með sjávarföllunum og virkri færslu súrefnissnaðari sjávar á útfalli.

Lágsúrefnissvæðið minnkar töluvert og meðalsúrefnisstyrkur innri fjarðar hækkar umtalsvert í kjölfar lágstyrkstímabilsins í lok janúar 2014. Líkanreikningar gefa til kynna að álíka mikið magn síldar hefur verið á ferðinni, en samhliða stórstraumi með sérstaklega hárra stöðu á flóði (um 2,6 m) jókst vindhraði þá verulaga, úr 2-3 m/s í um 10-15 m/s á brú og við Eiði. Vindur kom þar að úr norðaustri og var því vindhraðaaukningin í botni og við Kolgrafir miklu minni (Mynd 78). Vindurinn varð í kjölfarið austanstaðari og lækkaði því vindhraðinn samhliða minnkandi straumi og lækkaði því súrefnisstyrkur í innri fjarðar nokkuð á nýjan leik.

Vindafar hélst með svipuðu sniði inn í næsta stórstraum sem náði hámarki nálægt miðjum febrúar 2014. Sjávarhæð á flóði var þó umtalsvert lægri en á stórstraumnum hálfum mánuði fyrr, náði mest um 1,7 m í stað 2,6 m. Meðalsúrefnisstyrkur innri fjarðar hélst við þetta álíka lágur og í smástraumnum á undan. Þótt líkaniðurstöður gáfu til kynna heldur minna magn síldar á stórstraumnum hálfum mánuði þar á eftir, í byrjun mars 2014, munar væntanlega mestu um að straumurinn steig á flóði í um 2,3 m, varðandi það að meðalsúrefnisstyrkur innri fjarðar reis í 6 ml/l (Mynd 78). Súrefnisstyrkur í lágsúrefnissvæði ytri fjarðar jókst í takti við þetta og steig ívið hærra en mánuði áður (Mynd 77).

5.7. Áhrif vinds á súrefnisstyrk

Til þess að greina betur möguleg umhverfisáhrif á súrefnisbúskap Kolgrafafjarðar voru vindmælingar bornar saman við súrefnismælingar í firðinum.

Greining á lághleypisíuðum súrefnismælingum sýnir greinilegar sveiflur í súrefnisstyrk á tímaskalanum dagar eða vikur. Samsvarandi greiningu var þar af leiðandi beitt á 24 klst meðaltöl mælds meðalvindhraða á veðurstöðvunum í Kolgrafafirði þar sem sveiflur með 10 sólarhringa sveiflutíma eða minni voru síðar frá. Með því fékkst ferill sem sýndi með greinanlegri hætti veðuratburði á þessum langa tímaskala (Mynd 80 - Mynd 83). Í kjölfarið voru lághleypisíðar vindhraðamælingar í Kolgrafafirði bornar saman við lághleypisíðar súrefnismælingar (28 klst síun), sjá Mynd 84 - Mynd 85.

Eftir 15.9.2013 (fyrsta punktalína á Mynd 84) lækkar vindhraði verulega á öllum stöðvum, en nær toppi aftur um 10.10.2013 (önnur punktalíkna á Mynd 84). Ef súrefnismælingarnar eru skoðaðar innan þessa sama tímabils má sjá greinilega svörun við þessa niðursveiflu í mældum vindhraða. Þar er einnig einkennandi nokkuð stöðugt tímabil lágs vindhraða (milli heilu lóðréttu línanna á Mynd 84) þar sem súrefnisstyrkurinn fellur. Veruleg aukning í súrefnisstyrk fylgir hinum aukna vindstyrk í aðdraganda 10.10.2013 og verður súrefnisstyrkur einsleitur milli mælistöðva.

Frá 10.10.2013 fram til 30.10.2013 (milli annarrar og þriðju punktalínu á Mynd 84) verður önnur niðursveifla í vindhraða sem leiðir til lækkaðs súrefnisstyrks, en vindstyrksaukningin sem eftir fylgir endurheimtir nokkurn veginn fyrri súrefnisstyrk. Vikurnar á eftir eru sveiflur í vindhraða eða súrefnisstyrk ekki eins afgerandi. Hins vegar sést greinileg lækkun í súrefnisstyrk í nóvember sem ætla má að sé tilkomin vegna síldarganga, en vindur á þeim tíma er nærri meðallagi.

Um 13.12.2013 fellur súrefnisstyrkur umtalsvert og nær lágmarki um 23.12.2013 (fyrsta punktalína á Mynd 85). Ekki er lækkuðum vindstyrk um að kenna, en vindstyrkurinn er nokkurn veginn í meðallagi á þessum tíma. Aðlögun vatnsgæðalíkansins gaf hins vegar til kynna að umtalsvert magn af síld hlýti að vera til staðar (Mynd 51). Eftir 23.12.2013 eykst súrefnisstyrkur samhliða auknum vindhraða og nær toppi um 3.1.2014 (önnur punktalíkna á Mynd 85). Lækkun vindhraða dagana þar á eftir leiðir til stíglækkaðs styrk súrefnis vegna viðveru síldarinnar en súrefnisstyrkur er aðeins sveiflukenndur í kjölfarið vegna sveiflna í vindstyrk.

Eftir 13.1.2013 verður djúp niðursveifla í vindhraða fram að um 2.2.2014 (þriðja punktalína á Mynd 85). Innan þessa tímabils má sjá verulega lækkun í súrefnisstyrk. Þar að auki kemur nokkuð stöðugt tímabil lágs vindhraða (milli heilu lóðréttu línanna á Mynd 85) þar sem súrefnisstyrkur fellur mjög hratt. Lægstu mældu gildin fara undir 3 ml/l. Vindur nær sér aftur á strik að þessu tímabili loknu og eykst súrefnisstyrkur í takti við það.

Samanburður á vindstöðvunum yfir þetta tímabil sýnir að almennt séð er hærri vindhraði á brúnni og Eiði en við Kolgrafir og í fjarðarbotni en þó koma atburðir þar sem vindhraðinn er mestur í fjarðarbotni.

Áhugavert er að bera saman tímabil lágs vindhraða í janúar 2014 (milli heilu lóðréttu línanna á Mynd 85) við svipað tímabil sem átti sér stað fyrr um veturinn (milli heilu lóðréttu línanna á Mynd 84). Það tímabil er þó nokkuð lengra en tímabilið í janúar en með nokkuð hærri vindhraða. Í janúar er aftur á móti mun meira fall í súrefnisstyrk og munar þar að öllum líkindum um að á tímabilinu í janúar var síld gengin inn í fjörðinn, var metin um 60 þúsund tonn 11. janúar.

Þrátt fyrir að þetta magn síldar hafi verið á ferðinni í firðinum og orsakað hversu hratt gekk á súrefnisstyrk yfir tímabilið með lágum vindhraða í janúar, að þá um leið og vindhraði eykst aftur um 27. janúar þá eykst súrefnisstyrkurinn nokkuð hratt aftur en fellur svo aftur samhliða nokkuð minnkandi vindhraða. Þessi samanburður gefur til kynna að til þess að þetta magn síldar hafi umtalsverð áhrif á súrefnisstyrk fjarðarins að þá þurfi umhverfisaðstæður einnig að vera óhagstæðar.

Af framangreindu má ráða að svörun í mældum súrefnisstyrk við mælingar á vindhraða er vel sjáanleg í þessum gögnum, þá sérstaklega þegar sveiflur í vindstyrk eru nokkuð afgerandi. Áhrifin eru svo mismikil eftir því hvort síld er til staðar eða ekki.

6. Umhverfisaðstæður í aðdraganda síldardauðaáttur

6.1. Síldardauði í desember 2012

Í aðdraganda síldardauðans sem varð vart 14. desember 2012 er eingöngu hægt að nýta vindmælingar af Kolgrafafjarðarbrú og má beita sömu aðferð og að framan til þess að sjá breytingar á lengri tímaskala í vindhraða, sjá Mynd 86.

Dagana á undan 14. desember 2012 var vindhraði frekar lágur, í kringum 5 m/s að meðaltali sem er þó ekkert sérstaklega lágt miðað við sum önnur tímabil, t.a.m. í október 2012 (Mynd 86). Það sem skilur þó á milli er að tímabilið sem þessi frekar lági vindhraði varði er langt, eða um 20 dagar, frá um

25. nóvember. Vindhraðinn var þetta lágur þar til um 19. desember, þegar hann jókst aftur, sjá Mynd 86. Þetta tímabil virðist töluvert lengra en lágvindstímabil árið eftir, þegar vettvangsmælingar stóðu yfir auk þess sem vindhraði er nokkuð hærri. Áberandi lágvindstímabil yfir veturinn 2013-2014 eru nær því að vera 5-10 dagar með vindstyrk nokkuð undir 5 m/s (Mynd 81).

Framangreint u.þ.b. 20 daga lágvindstímabil í aðdraganda fyrri síldardauðaatburðarins fór saman við stórstraum með lága sveiflu milli flóðs og fjöru, þar sem fjara féll lægst í um -1,7 m hæð og flóð reis hæst í um 1,7 m hæð, og smástraum í kjölfarið. Dauðans varð síðan vart á vaxandi straumi á næsta stórstraumi sem steig mun hærra en stórstraumurinn hálfum mánuði fyrr (sjá Mynd 87).

6.2. Síldardauði í lok janúar 2013

Þótt vindhraði hafi verið lágur daginn áður en síldardauða varð vart þann 1. febrúar 2013 (Mynd 88), var næstum fimm daga tímabil þar á undan þar sem vindhraði var hár, og nokkuð stóran hluta þess tíma var vindhraði yfir 16 m/s. Dagurinn sem markar byrjun þessa hávindatímabils er 26. janúar 2013. Dagana þar á undan er nálægt 20 daga tímabil þar sem meðalvindur er tæplega 6 m/s, samanborið við meðalvind nær 5 m/s á álíka löngu tímabili í aðdraganda fyrri síldardauðans. Tímabilið í janúar fellur saman við stórstraum með frekar hárri sveiflu milli mesta flóðs og fjöru, og smástraumi í kjölfarið með frekar lágri sveiflu (u.þ.b. 1,5 m).

Miðað hefur verið við að síldardauðans hafi orðið vart þann 1. febrúar 2013. Hins vegar er vitnaði í sjónarvott í grein Skessuhorns frá 1. febrúar (www.skessuhorn.is) þar sem viðkomandi hafi seint daginn áður séð kraumandi sjó af hálfdaðri síld og þorsk að því er virtist vankaðan í land að drepast. Fiskdauði virðist því hafa farið saman við vindstilluna þann 31. janúar, þrátt fyrir hinn mikla vind dagana þar á undan. Í framangreindri grein Skessuhorns er jafnframt vísað til þess að veðuraðstæður væru þær sömu og um miðjan desember þegar fyrri síldardauðinn varð, logn og froststilla. Af Mynd 88 má ráða að þessi lýsing geti einungis átt við 31. janúar en ekki dagana þar á undan, nema litið sé til 5 daga aftur í tímann, til 25. janúar.

Vegna fyrri síldardauðaatburðar var súrefniskrefjandi niðurbrot til staðar í aðdraganda seinni síldardauðans. Hugsa mætti sér að sú viðbótarsúrefnisupptaka samhliða súrefnisupptöku lifandi síldar á lágvindstímabili í aðdraganda 25. janúar 2013 hefði getað leitt til síldardauða af samsvarandi orsökum og 13. desember 2012. Þáttur smástraums í báðum tilfellum getur einnig hafa ráðið einhverju. Þar sem síldardauðans varð ekki vart fyrr en nokkrum dögum seinna þarf að leita frekari fanga við að meta orsakavald súrefnisskortsins sem leiddi til síldardauðans.

7. Algengi lágvindsaðstæðna í Kolgrafafirði að vetri

7.1. Lággildi vetrarvinds með mismunandi varanda

Mæliröð vindstyrks á Kolgrafafjarðarbrú spannar um 10 ár, frá 2005 til 2015. Mynd 89 sýnir reiknaðan meðalvindhraða á brúnni yfir hlaupandi 5, 10 og 20 daga meðaltalstímabil, samfelld yfir alla mæliröðina. Viðmiðunartímabil að vetri, nóvember til og með febrúar er skyggt með gráum lit. Horft er sérstaklega til þessa tímabils með hliðsjón af því hvenær búast má við síldargöngum og erfiðum aðstæðum vegna þeirra út frá fyrirliggjandi gögnum. Verulegur breytileiki er milli ára. Áberandi er að þótt lággildi 5, 10 og 20 daga meðaltalstímabila yfir veturinn 2012-2013 falli öll í desember, þegar fyrsta síldardauðans varð vart, er meðalvindstyrkur tiltölulega hár miðað við lággildi annarra vetra á mælitímabilinu.

Tafla 7 dregur saman lágsta meðalvindstyrk hvers vetrar yfir mæliröðina fyrir mismunandi meðaltalstímabil, þar sem lággildunum hefur verið raðað í vaxandi röð fyrir hvert meðaltalstímabil. Til viðbótar meðaltalstímabilum 5, 10 og 20 daga sbr. að framan er jafnframt greint frá styttri meðaltalstímabilum, 2, 3 og 4 daga. Mynd 90 - Mynd 94 sýna reiknuð meðaltöl fyrir öll meðaltalstímabil, eitt ár í senn, svo unnt sé að greina nánar hvenær lággildi lenda innan vetrar. Árið sem lággildin vísa til í Tafla 7 marka byrjun vetrar, þ.e. veturinn 2010-2011 t.a.m. flokkast sem árið 2010. Miklar síldargöngur eru staðfestar veturinn 2011-2012 og veturinn á eftir, 2012-2013, þegar síldardauða varð vart. Yfir einungis einn til tvo vetur af þessum 10 vetrum sem til viðmiðunar eru voru lággildi meðalvinds hærrí en veturinn 2011-2012, eftir því hvaða meðaltalstímabil er valið. Það eru veturinn 2005 og 2014, en sá síðarnefndi hefur hæstu lágsmörkin í öllum meðaltalstímabilum utan 2 daga (Tafla 7). Lággildin yfir veturinn 2012-2013 eru nokkuð lægri en veturinn á undan, en raðast þó frekar hátt fyrir öll meðaltalsgildi utan 20 daga, þar sem það raðast í 4. sæti af 10.

Veturinn þar á eftir, þegar rannsóknin fór fram, 2013-2014, eru lággildi umtalsvert lægri en veturinn á undan fyrir 3, 4, 5 og 10 daga meðaltöl en svipuð fyrir 2 og 20 daga meðaltalstímabil. Lægsti 10 daga vindstyrkurinn á sér stað þennan vetur og 3, 4 og 5 daga styrkurinn raðast í 3. sæti af 10. Staðfest magn síldar þennan vetur er miklu minna en veturna tvo þar á undan og færa má að því líkum að með álíka mikið magn síldar og veturinn á undan gæti annar síldardauði hafa orðið að veruleika.

Athygli vekur að lággildi vetrar 2010-2011 raðast í 1. til 2. sæti í öllum tilvikum (Tafla 7) og virðist því hafa verið einstaklega lágur vindur á löngum kafla þann vetur. Ekki eru neinar upplýsingar um að síld hafi verið til staðar í Kolgrafafirði þennan veturinn, eins og veturinn á eftir, en leiða má að því líkum að ef síldin hefði flykkst inn í jafnmiklum mæli og veturna tvo á eftir, að þá hefðu aðstæður að öllum líkindum verið töluvert verri en í desember 2012 þegar síldardauða varð vart. Búast má því við að síld hefði drepist við þær aðstæður.

Mynd 95 dregur saman niðurstöðurnar úr Tafla 7 með þeim hætti að lággildi vetrarvindsins fyrir hvert meðaltalstímabil er sett í samhengi við hlutfall lággilda sem eru jafnt eða lægra en viðkomandi lággildi. Gagnapunktur fyrir veturna 2010, 2011, 2012 og 2013 eru sérstaklega dregnir fram. Eins og að framan er greint frá hafa aðstæður veturinn 2010 verið sjaldgæfastar og sístar gagnvart endurnýjun súrefnis í Kolgrafafirði og væntanlega því alvarlegastar gagnvart síldargöngum. Síldin sem flykkist inn í fjörðinn veturinn þar á eftir, 2011, varð fyrir eins ákjósanlegum aðstæðum hvað þetta snertir og þessi 10 ára veðurröð býður upp á, sem skýrt gæti hvers vegna síldardauða varð ekki vart fyrr en veturinn þar á eftir, 2012, þegar ámóta magn síldar, hátt í 300 þúsund tonn, flykkist á nýjan leik inn í Kolgrafafjörð. Þótt aðstæður væru umtalsvert verri en veturinn á undan, má sjá að í 40-80% tilvika má búast við ámóta aðstæðum eða lakari, miðað við þessa 10 ára röð. Lágvindsaðstæður veturinn 2012-2013 geta því ekki talist sérstaklega sjaldgæfar eða slæmar, en greinilega nægjanlega slæmar til að 10% af þeirri síld sem var á ferðinni drapst. Aðstæður veturinn eftir meðan á rannsókninni stóð, voru bæði sjaldgæfari og verri, og má því teljast mildi að síldin flykkist ekki í Kolgrafafjörð í eins miklum mæli og veturinn á undan.

Ekki er með góðu móti hægt að tilgreina þröskuldsvindstyrk fyrir tiltekin meðaltalstímabil, þar sem vænta má síldardauða. Upphafsstyrkur súrefnis þegar síldargöngur hefjast skiptir eðlilega máli sem og magn síldar sem til staðar er. Svörun í falli súrefnisstyrks með tilkomu síldar er hins vegar mjög hröð í reiknilíkaninu, þ.a. vægi upphafsgildis fer fljótt minnkandi. Einnig er ekki fyllilega ljóst hvort 1,6-2,7 m/s meðalstyrkur yfir 2-3 daga hafi ráðið úrslitum fyrir það magn síldar sem var til staðar í desember 2012 eða hvort lengra tímabil í aðdraganda atburðarins hafi skipt meira máli. Meðaltöl 4-20 daga í aðdraganda atburðarins eru á bilinu um 3-5 m/s. Það sem flækir einnig málið er að einungis um 10% af þeirri síld sem talin er að var á ferðinni á þessum tíma drapst.

7.2. Tíðni og varandi lágvindstímabila að vetri

Endurnýjun súrefnis um yfirborð meðan síldargöngur vara ræður miklu um hvort til súrefnisskorts kemur. Í greiningunni að framan var horft til lággildi vinds að vetri til samanburðar milli vetra síðustu ára, en ekki horft til þeirrar tíðni sem lággildaðstæður geta verið til staðar þar sem alvarlegar aðstæður með þessu tilliti geta átt sér stað í fleiri en einum atburði á vetri. Því er hjálplegt að setja þá atburði sem þekktir eru að hafa valdið einhverjum vandkvæðum í súrefnisbúskap Kolgrafafjarðar í samhengi við tíðni lágvindsatburða yfir þá mæliröð sem fyrir liggur af Kolgrafafjarðarbrú. Atburðirnir sem liggur beint að taka til viðmiðunar eru þegar síldardauða varð vart, 14. desember 2012 og 1. febrúar 2013, sem og þegar súrefnisstyrkur var hvað lægstur í Kolgrafafirði meðan á rannsókninni stóð og áhyggjur manna beindust að hvort síld kynni að drepast þá. Þessi atburður er í aðdraganda 27. janúar 2014.

Flæði súrefnis um yfirborð sjávar reiknast sem margfeldi af flutningshraða súrefnis um yfirborð (e. *oxygen transfer velocity*) og mismunastyrk súrefnis milli mettnarmarks og þess styrks sem er til staðar við yfirborð. Mettnarmark súrefnis er háð hitastigi, seltu og þrýstingi en við yfirborð er það hitastigi sem ræður mestu og lækkar mettnarmark súrefnis með hækkandi hitastigi. Til að leggja mat á mögulegan flutning súrefnis frá andrúmslofti í yfirborð sjávar ef súrefnisstyrkur sjávar er undir mettnarstyrk var reiknaður flutningshraði súrefnis um yfirborð skv. Wanninkhof (1992), sem fall af hitastigi sjávar og vindhraða í öðru veldi. Til útreiknings á meðalsólarhringsflutningshraða súrefnis var notast við fast hitastig sjávar, 3 °C, og mældan meðalsólarhringsvindhraða á Kolgrafafjarðarbrú. Lægsti og hæsti mældi sólarhrings meðalsúrefnisflutningshraði yfir alla mæliröðina á brúnni eru 1,02e-07 m/s og 2,8e-04 m/s.

Eins og í greiningunni að framan er vetrartímabilið sem til skoðunar er skilgreint frá 1. nóvember til 28. febrúar ár hvert, yfir 10 ára tímabilið 2005–2015. Alls eru því um 1235 daga að ræða til viðmiðunar. Fyrir hvern þessara daga eru reiknuð meðaltöl fyrir meðalsólarhringsflutningshraða súrefnis yfir dagana á undan viðmiðunardeginum, allt frá 2 dögum á undan til 40 dögum á undan. Mynd 96 sýnir þessi gildi röðuð eftir tíðni, þ.e. fjölda tímabila með jafn mikinn eða minni meðalsúrefnisflutningshraða (hlutfall, %) og lengd meðaltalstímabila undan hverjum viðmiðunardegi. Jafngildislínur meðalsúrefnisflutningshraða eru dregnar yfir stærðargráðu, frá 5e-06 m/s til 5,5e-05 m/s. Öll gildi meðalsúrefnisflutningshraða, fyrir hvert meðaltalstímabil, er síðan sýnt með aðgreindum litum fyrir viðmiðunardagana þrjá, 14. des. 2012, 1. feb. 2013 og 27. jan. 2014.

Í aðdraganda viðmiðunardagsins 14. desember 2012 reiknast lægsti meðalsúrefnisflutningshraðinn 1,4e-06 m/s, sem á sér stað á 3 daga meðaltalstímabili fram að viðmiðunardeginum. Einungis 1,2% 3 daga meðaltala hafa jafn mikinn eða minni meðalsúrefnisflutningshraða, en það svarar til einungis 15 viðmiðunardaga yfir alla daga nóvember til febrúar, öll 10 ár mæliraðarinnar. Hæsti meðalsúrefnisflutningshraðinn reiknast hins vegar 3,0e-5 m/s, sem á sér stað á 37 daga meðaltalstímabili fram að viðmiðunardeginum. Um 18% 37 daga meðaltala hafa jafn mikinn eða minni meðalsúrefnisflutningshraða, en það svarar til 222 viðmiðunardaga. Með flest önnur reiknuð gildi vel undir 15% tímans, má sjá að tímabilið í aðdraganda síldardauðans sem vart varð 14. desember 2012 var tiltölulega sjaldgæft miðað við þau 10 ár sem undir eru í greiningunni. Alls 18 af 40 punktum á grafinu falla undir 10% tímans og sjaldgæfasti atburðurinn á sér stað fyrir 23 daga meðaltalstíma, þegar meðalsúrefnisflutningshraði reiknast 1,5e-05 m/s, sem gerist einungis 1,1% tímans eða yfir einungis 14 viðmiðunardaga.

Í aðdraganda viðmiðunardagsins 1. febrúar 2013 var vindur mun sterkari og reiknaður meðalsúrefnisflutningshraði allt annað en sjaldgæfur ef undanskildir eru dagarnir 3 á undan. Lægsta og sjaldgæfasta

tilfellið falla saman fyrir 2 meðaltalsdaga, $3,5e-06$ m/s, sem á sér hliðstæðu eða lægra gildi 9,9% tímans sem svarar til 122 daga yfir vetrarmánuðina fjóra þau 10 ár sem til skoðunar eru. Þriggja daga gildið er um $1,0e-05$ m/s og á sér stað um 21% tímans. Hæsta gildið er $7,1e-05$ m/s, sem á sér stað á 7 daga meðaltalstímabili fram að viðmiðunardeginum. Um 94% tímans má búast við jafnháu gildi eða minna, sem svarar til 1161 dags yfir það tímabil sem til skoðunar var. Öll gildi með meðaltalstímabil 4 dagar eða meira eiga hliðstæðu eða minna gildi yfir 40% tímans. Allt bendir til þess að lágur vindstyrkur í aðdraganda síldardauðans sem vart varð 1. febrúar 2013 hafi ekki verið ráðandi þáttur gagnvart þeim súrefnisskortum sem talinn er hafa orðið. Laggildin áttu sér stað nokkrum dögum fyrr og teljast hvorki sérstaklega sjaldgæf né sérstaklega lág. Hins vegar er ekki útilokað að tiltölulega sterkur norðaustanvindur rétt á undan atburðinum (Mynd 86) hafi hreyft eitthvað við botnvatni með lágum súrefnisstyrk vegna rotnunar síldar og fært það að síld sem var á ferðinni. Sú dauða síld er fannst í þessum atburði var takmörkuð við vesturhluta innri fjarðar. Ekki liggja fyrir fullnægjandi gögn til að kanna þetta til hlítar.

Í aðdraganda viðmiðunardagsins 27. janúar 2014 var vindur mjög lágur. Lægsti reiknaði meðalsúrefnisflutningshraði er $2,2e-06$ m/s, sem á sér stað á 3 daga meðaltalstímabili. Búast má við slíku einungis 2,7% tímans sem svarar til 33 daga yfir viðmiðunarröðina. Sjaldgæfasta gildið reiknast hins vegar $5,2e-06$ m/s fyrir 12 daga meðaltalstímabil, en slíkt á sér hliðstæðu einungis 0,16% tímans sem svarar til 2 daga yfir allt viðmiðunartímabilið. Sem meira er, öll gildi frá 2 til 15 daga meðaltalstíma eiga sér hliðstæðu undir 5% tímans og um helmingur þeirra undir 2% tímans. Þegar reiknað er fyrir 16 til 22 daga meðaltalstímabila er tíðnin um 12-15% en eftir það fara atburðirnir að vera mun algengari. Ljóst má vera að ekki einungis var meðalsúrefnisflutningshraði mjög lágur í aðdraganda viðmiðunardagsins, heldur finnast mjög fáar hliðstæður í þeirri 10 ára veðurroð sem til er frá Kolgrafafjarðarbrú. Líklegt má telja að mikið meira magn af síld en til staðar var í Kolgrafafirði á þessum tíma, jafnvel eitthvað í líkingu við það sem var á ferðinni árin tvö á undan, hefði leitt til einhvers síldardauða.

7.3. Lágvindstímabil í skjóli austlægra vindátta

Vindhraða og -stefnu yfir yfirborði úr Harmonie veðurlíkaninu fyrir 27. janúar 2014 kl 13:00 má sjá á Mynd 97. Töluverður vindur er í Breiðafirði en Kolgrafafjörður virðist liggja í nokkru skjóli þar sem vindhraði er töluvert minni. Í viðauka C má sjá breytileika í vindsviði Breiðafjarðar innan dagsins fyrir 27. janúar 2014. Norðaustlæg átt er ríkjandi, breytilegur vindstyrkur í Breiðafirði yfir daginn með vindhraða allt að 14-16 m/s en stilla um morguninn með ströndinni sunnanverðri frá Hvammsfirði í austri, vestur fyrir Grundarfjörð. Frá hádegi hefur örlítið bætt í vindinn við suðurströndina en vindur er enn þó lágur, einna stillast í Kolgrafafirði. Greinilegt skjól er frá austlægum áttum.

Sambærilega hegðun má einnig sjá í aðdraganda 27. janúar 2014 en stakar myndir kl 9:00 frá 16. – 31. janúar 2013 má einnig sjá í viðauka C. Á tímabilinu er töluverður breytileiki í veðurlagi yfir Breiðafirði, en stillur eru almennts séð þó í Kolgrafafirði og oft víðar við suðurströndina. Ríkjandi vindafar í aðdraganda laggildis súrefnisstyrks í Kolgrafafirði 27. janúar 2014 ætti þannig að hafa valdið verulegu misræmi í endurnýjun súrefnis við yfirborð milli Kolgrafafjarðar og Breiðafjarðar. Í Kolgrafafirði voru ríkjandi stillur með lítilli endurnýjun súrefnis um yfirborð sjávar, en úti í Breiðafirði voru ýmist stillur eða hvass vindur og því ætti súrefnisendurnýjun þar um yfirborð sjávar að hafa verið nokkur á tímabilinu.

Þegar vindur verður heldur norðanstaðari í Breiðafirði, eins og Mynd 98 sýnir fyrir 8. febrúar 2014 kl 23:00, má greina töluvert hærri vindhraða innan Kolgrafafjarðar en þegar vindurinn er austlægari (Mynd 97).

Vindafar í Kolgrafafirði virðist stýrast að vissu leyti af stefnu vindáttar við Klofning í mynni Hvammsfjarðar. Þá má sjá frá niðurstöðum veðurlíkansins að í ANA áttum stýrist vindur frá Klofningi inn að Grundarfirði en þegar vindstefna færast meira til austurs verður skjólsvæði jafnvel að Hellissandi. Þegar vindstefna verður norðlægar á vindur greiða leið inn í Kolgrafafjörð en norðaustan vindur er algengastur á veðurstöð brúarinnar og við Eiði í Kolgrafafirði (Mynd 3). Þegar austanvindar ríkja í Breiðafirði verða ríkjandi stillur í austurhluta innri Kolgrafarfjarðar, en það má rekja til umlyggjandi fjalla í Kolgrafafirði eins og áður hefur komið fram.

8. Þáttur vegfyllingar við óhagstæðar umhverfisaðstæður við síldargöngur

Til mats á áhrifum vegfyllingar á súrefnisástand Kolgrafarfjarðar við umhverfisaðstæður er geta leitt til lágs súrefnisstyrks fjarðarins var vatnsgæðalíkani beitt með og án vegfyllingar fyrir sama magn og dreifingu síldar, og niðurstöður reikninga bornar saman. Í umfjölluninni að neðan er greint frá breytingum í straumhegðun í firðinum með tilkomu vegfyllingar og þeim aðstæðum þar sem helst gætir munar í súrefnisstyrk innri fjarðar, og hvernig þær orsakast.

8.1. Straumhegðun með og án vegfyllingar

Niðurstöður straumlíkansins með og án vegfyllingar staðfesta fyrri reikninga um að brúarop vegfyllingarinnar tryggir vatnsskipti í firðinum (Mynd 99). Einnig má sjá út frá mælingum að útslag sjávarhæðar er keimlík innan og utan vegfyllingar sem enn frekar staðfestir trygg vatnsskipti um brúarop vegfyllingarinnar. Í framangreindri greiningu á mældri sjávarhæð og straumum er jafnframt sýnt fram á að sjávarföll eiga greiða leið um Kolgrafafjörð (kafli 5), en straumhegðun er flókin í firðinum og breytileg eftir sveiflu sjávarfalla (kafli 5.2).

Samanburð á reiknuðum straumum með og án vegfyllingar má finna í Viðauka D fyrir útfall, liggjanda á fjöru, aðfall og liggjanda á flóði fyrir mismunandi stór- og smástrauma. Reikningarnir koma frá straumhluta vatnsgæðalíkansins og sýna hversu breytileg straumhegðun fjarðarins getur verið sem og breytta straumhegðun með og án vegfyllingar umfram það sem lýst er hér að ofan.

Með tilkomu vegfyllingar má sjá út frá líkanreikningunum að breyting verður í straumhegðun innan sem utan vegfyllingar. Þannig verður t.a.m. færsla á meginstraumi í syðsta hluta Kolgrafarfjarðar og hringiðumyndun í nágrenni mesta dýpis innri fjarðar tekur jafnan nokkrum breytingum. Straumhegðun utan vegfyllingar breytist ekki hvað síst á flóði þar sem mismunandi staðsetning vatnsopsins yfir þröskuld innri fjarðar veldur því að færsla er á meginstraum út úr innri firði og hringiðumyndun bæði nálægt vegfyllingu og fjær henni, nær mynni fjarðarins, verður önnur.

Á aðfalli má sjá breytingu í straumhegðun í næsta nágrenni vegfyllingarinnar í ytri firði þar sem Hjarðarbólsoddi (við vestari enda þröskuldar í Kolgrafafirði) breytir stefnu strauma í átt að náttúrulegu vatnsopi án vegfyllingar, en vegna legu brúarops fara straumar í gegnum núverandi vatnsop á Hjarðarbólsodda. Eftir tilkomu vegfyllingar hefur meginstraumur inn fjörðinn færst til vesturs vegna staðsetningar brúar. Fyrir vegfyllingu má sjá meginstraum inn í innri fjörð um vatnsop við austari enda þröskulds Kolgrafarfjarðar. Vestan þessa meginstraums myndast réttisælis hringiða og önnur rangsælis hringiða austan meginstraumsins, þessar hringiður verða öflugari með auknum útslögum sjávarfallanna. Með tilkomu vegfyllingar hefur straumhegðun því breyst töluvert, en nánari lýsing á straumhegðun innri fjarðar með vegfyllingu má finna í kafla 5.2.

Á útfalli er straumur nokkuð svipaður innan vegfyllingar að undanskilinni færslu strauma til vesturs. Vegna þrengingar vatnsops með tilkomu vegfyllingar er meiri straumhraði um snið vegstæðisins samanborið við hraða um sama snið við náttúrulegar aðstæður. Vegna mismunandi legu og staðsetningu vatnsops með og án vegfyllingar má sjá töluverða breytingu á straumhegðun vegna straumhraða breytingarinnar í ytri friði. Í báðum tilvikum liggja straumar meðfram vesturströndinni en straumar án vegfyllingar liggja þó lengra til austurs frá ströndinni. Þessi færsla strauma til vesturs eftir tilkomu vegfyllingar leiðir af sér að rangsælis hringiða sem myndast vestan við meginstraum frá vatnsopi minnkar umtalsvert.

8.2. Súrefnisstyrkur í innri firði

Reiknaður 12 klst meðalsúrefnisstyrkur með og án vegfyllingar fyrir innan vegstæðið (innri Kolgrafafjörður) má sjá á Mynd 100. Álag síldar vegna súrefnisupptöku í báðum tilvikum er sett sem aðlagð síldarmagn sem lýst er í kafla 4.3.2. Almennt er meðalsúrefnisstyrkur með og án vegfyllingar nokkuð sambærilegur. Meðalsúrefnisstyrkur í innri Kolgrafafirði með vegfyllingu er um 99,2% af meðalsúrefnisstyrk Kolgrafafjarðar án vegfyllingar að meðaltali yfir líkantímann. Minnst fer meðalsúrefnisstyrkur með vegfyllingu í um 92,4% af meðalsúrefnisstyrk án vegfyllingar en mest fer meðalsúrefnisstyrkur með vegfyllingu í 102,4% af meðalsúrefnisstyrk án vegfyllingar.

Umhverfisaðstæður geta myndast þar sem vegfylling leiðir til lakari meðalsúrefnisstyrks innan vegfyllingar eins og sjá má í lok janúar 2014 og um miðjan mars 2014 (Mynd 100). Þessar aðstæður eru uppsöfnuð áhrif sem myndast í samspili við lágsúrefnissvæðið við vesturströnd Kolgrafafjarðar utan vegfyllingar, sem lýst er í kafla 5. Ef ástand Kolgrafafjarðar er skoðað í plani með og án vegfyllingar fyrir 27. janúar 2014 (Mynd 101) má sjá að dreifing súrefnis er keimlík hvort sem vegfylling er til staðar eða ekki en merkjanlegur munur er á styrk þess súrefnis sem er til staðar. Jafnframt má sjá að lágsúrefnissvæðið sem rætt er um í kafla 5 er til staðar í báðum tilvikum. Litlu lægri súrefnisstyrkur virðist vera á þessu svæði þegar vegfylling er til staðar, sem endurspeglar að samspil innri fjarðar og lágsúrefnissvæðisins er öllu meira vegna staðsetningar brúaropsins við þær lágvindsaðstæður sem ríkjandi voru á þessum tíma síldarganga sem einnig fór saman við smástraum.

Til samanburðar má skoða næsta smástraum um hálfum mánuðum seinna, 8. febrúar 2014, þegar óverulegur munur er í meðalsúrefnisstyrk innan vegfyllingar með eða án vegfyllingar, en styrkurinn er litlu hærrí en reiknaðist án vegfyllingar í fyrra tilfellinu (Mynd 100). Á þeim tíma er vindstyrkur mun meiri en í aðdraganda fyrra samanburðartímabilsins, um 5-15 m/s meðalvindur yfir nokkurn tíma á mælistöðvunum fjórum við fjörðinn. Meðalsúrefnisstyrkur innri fjarðar hafði fallið frá stórstraumnum á undan um 1 ml/l, u.þ.b. helming af því sem fallið var í aðdraganda fyrra samanburðartímabilsins. Aðlögun vatnsgæðalíkansins gaf þó til kynna að öllu meira hefði verið af síld í aðdraganda þessa síðara samanburðartímabils en fyrir það fyrra (Mynd 51). Aukinn vindur sá því fyrir aukinni endurnýjun súrefnis. Á Mynd 102 sést hvernig reiknuð súrefnisdreifing er fyrir bæði tilfelli, með og án vegfyllingar, í lok dags þann 8. febrúar. Dreifing súrefnis er mjög sambærileg í báðum tilfellum. Lágsúrefnissvæðið hefur þó heldur lægri styrk með vegfyllingu en án hennar, og suðaustur af vegfyllingar verður styrkur heldur lægri við austari enda hennar. Að öðru leyti er sáralítill munur á súrefnisstyrk fjarðarins með og án vegfyllingar.

Umhverfisaðstæður geta jafnframt myndast þar sem vegfylling leiðir til hærrí súrefnisstyrks innan vegfyllingar eins og sjá má t.d. í byrjun janúar 2014 (Mynd 100). Aukningin er þó einungis lítilleg og varir stutt.

8.3. Áhrif síldar, vinds og sjávarfalla

Til nánari greiningar á svörun súrefnisástands fjarðarins með og án vegfyllingar við mismunandi álag vegna síldar voru fjögur tilvik reiknuð með föstu álagi innan vegfyllingar, þ.e. fyrir enga síld, 25, 50 og 100 þúsund tonn af síld. Í öllum tilvikum var magn síldar jafnskipt í rúmi á svæðin innan vegfyllingar og engin síld utan vegfyllingar. Jafnframt var gert ráð fyrir að síld komi inn í fjörðinn 31. október 2013 eins og áður. Mynd 103 sýnir reiknaðan 12 klst meðalsúrefnisstyrk innan vegstæðis, með og án vegfyllingar og fyrir mismunandi fast álag vegna síldar innan vegfyllingarinnar. Án álags vegna síldar má sjá smávægilegan mun á styrk súrefnis með og án vegfyllingar, en munurinn eykst töluvert með auknu álagi vegna síldar. Sá karakter sem lágstyrkssvæðið í vestari hluta ytri fjarðar, utan vegfyllingar, leiðir af sér gagnvart uppsöfnuðum áhrifum síldarinnar þegar vindstyrkur fellur, er sá sami hvort vegfyllingin er til staðar eða ekki. Með vegfyllingunni virðist staðsetning ops hennar valda því að heldur meira flyst af lágildissvæðinu utan vegfyllingar inn í innri fjörð en ella, og meðalstyrkur innan vegfyllingar verður því heldur lægri. Að sama skapi leiðir staðsetning brúaropsins til þess að lágsúrefnissvæðinu er frekar viðhaldið en ella.

Með því að reikna með föstu álagi vegna síldar (Mynd 103) fæst betur séð að dýfur í súrefnisstyrk eiga sér frekar stað þegar straumur er lágur. Sjávarföllin virðast þannig yfirvinna að einhverju marki lágstyrkssvæði súrefnis í ytri firði á stórstraumi með ferskara vatni úr Breiðafirði, sem skilar sér í hækkuðum súrefnisstyrk í innri firði. All nokkur breytileiki er í þessu samfara mismunandi sterkum vindi.

Til nánari greiningar á áhrifum sjávarfalla á súrefnisstyrk í líkaninu voru straumar reiknaðir aftur í straumhluta vatnsgæðalíkansins án vindáhrifa og vatnsgæðalíkanið keyrt með föstum vindhraða, 1, 6 og 11 m/s. Gert var ráð fyrir föstu álagi vegna síldar innan vegfyllingar þar sem 25 þúsund tonnum af síld var skipt jafnt í rúmi á svæðin innan vegfyllingar og engin síld var utan hennar. Með þessu fékkst jafnframt frekari greining á áhrifum vinds við endurnýjun súrefnis.

Mynd 104 sýnir reiknaðan 12 klst meðalsúrefnisstyrk með og án vegfyllingar fyrir innan vegfyllingu fyrir mismunandi fastan vindhraða. Til samanburðar við þessar keyrslur var vatnsgæðalíkaninu beitt fyrir 6 m/s fastan vind með upprunalegum straumreikningum með vindáhrifum m.a. til að meta áhrif vindstrauma á niðurstöður reikninganna. Með auknum vindstyrk minnkar munur á meðalsúrefnisstyrk með og án vegfyllingar töluvert. Þegar ekki er tekið tillit til vindáhrifa í straumhluta sést vel áhrif stöðu sjávarfalla þar sem súrefnisstyrkur innan vegfyllingar hækkar á stórstraumi og lækkar á smástraumi. Einnig er áhugavert að sjá að samanburður með og án vegfyllingar er mismikill eftir stöðu sjávarfalla þannig að á stórstraumi með meira útslagi verður munur með og án vegfyllingar minni en á stórstraumi með minna útslagi.

Ef áhrif vinds eru tekin með í straumhluta vatnsgæðalíkansins má sjá undirliggjandi áhrif sjávarfallanna á súrefnisstyrk þegar vind lægir en þau áhrif minnka töluvert með auknum vindi og verða þá ekki eins augljós. Áhrif vinds í straumhluta vatnsgæðalíkansins veldur einnig lækkun í súrefnisstyrk. Ætla má að norð- til norðaustlægar vindáttir leiði til strauma er halda við lágsúrefnissvæðið í vesturhluta ytri fjarðar og valda jafnvel aukinni dreifingu súrefnis þaðan í suðurátt. Innri fjörður er undir áhrifum af þessu alveg óháð hvort vegfyllingin sé til staðar eða ekki.

Mynd 105 sýnir 12 klst meðalsúrefnisstyrk með og án vegfyllingar fyrir innan vegstæðis fyrir grunddreifingu síldar (sjá nánar í kafla 4.3.2) samanborið við dreifingu þar sem allri síld innan vegfyllingar hefur verið komið fyrir á nyrðra svæði innan vegfyllingar (sjá Mynd 43). Samanburðurinn sýnir að dreifing síldar breytir ekki hvenær áhrifa vegfyllingar gætir heldur veldur skipting milli svæðanna eingöngu hliðrun í reiknuðum meðalsúrefnisstyrk. Þessi samanburður ásamt greiningu

vegna mismunandi álags hér að ofan bendir til að áhrif vegfyllingar við síldargöngur ráðast af umhverfisaðstæðum, þ.e. stöðu sjávarfalla og vindafari.

8.4. Breytt súrefnisflæði milli innri og ytri fjarðar vegna stöðu sjávarfalla

Greina má frekar breytta straumhegðun með tilkomu vegfyllingar sem leiðir af sér breytt súrefnisflæði milli innri og ytri fjarðar og skýrir framangreindan mun í súrefnisstyrk innan vegfyllingar á mismunandi stöðu sjávarfalla. Mynd 106 sýnir tímaraðir reiknaðs súrefnisstyrks í völdum punktum í innri og ytri firði frá 10. janúar 2014 til 16. febrúar 2014. Til samanburðar er sýndur reiknaður meðalsúrefnisstyrkur innri fjarðar yfir tímabilið á 12 klst meðaltalsgrunni, ásamt mældri sjávarhæð í H4. Bæði er sýndur súrefnisstyrkur með og án vegfyllingar. Í austurhluta ytri fjarðar (ljósblár ferill, efri hluti myndar) reiknast mjög sambærilegur styrkur með og án vegfyllingar. Í vesturhluta ytri fjarðar (grænn ferill, efri hluti myndar), innan þess svæðis sem fjallað hefur verið um að framan sem lágsúrefnisvæði, er nokkur munur í súrefnisstyrk eftir því hvort reiknað er með vegfyllingu eða án hennar. Helst fer munar að gæta eftir 15. janúar 2014.

Þegar inn fyrir vegfyllinguna er komið (rauður ferill, efri hluti myndar) er lítillegur munur milli tilfella. Helst gætir munar, þar sem styrkur er heldur lægri með vegfyllingu en án hennar, milli 22. janúar 2014 og 30. janúar 2014. Innarlega í innri firði (dökkblá lína, efri hluti myndar) reiknast merkjanlegur munur milli 18. janúar 2014 og 3. febrúar 2014. Hluti þessa munar skýrist af því að síld er höfð til staðar í líkaninu á suðursvæðinu fram að 1. febrúar, en eftir þann tíma einungis á nyrðra svæðinu. Breyting í dreifingu síldar innan innri fjarðar breytir ekki um að meðalsúrefnisstyrkur innri fjarðar reiknast heldur lægri á þessum tíma með vegfyllingu en án hennar.

Mynd 107 sýnir reiknaða strauma lagða ofan á reiknaðan súrefnisstyrk í Kolgrafafirði í lok útfalls á stórstraum með lágu útslagi, þann 20. janúar 2014 kl. 15. Á þessum tíma hefur meðalsúrefnisstyrkur innan vegfyllingar lækkað lítillega samanborið við þegar vatnsopið er austar fyrir tilkomu vegfyllingarinnar (Mynd 106). Mismunurinn fer vaxandi þar sem súrefnisstyrkur lækkar hraðar með vegfyllingunni en án hennar.

Á útfallinu liggur sterkur straumur út um vatnsop á þröskuldi innri fjarðar. Í tilfelli vatnsops vegfyllingarinnar liggur straumurinn nokkuð vestar og er sá súrefnisstyrkur sem honum fylgir á móta mikill og sá sem er til staðar innan vegfyllingarinnar. Straumurinn er óslitinn að mynni fjarðarins en suðlægt bakrennsli má sjá við vesturströndina móts við þennan meginstraum. Í austurhluta straumsins er lítilleg réttisælis hringiða u.þ.b. fyrir miðjum ytri firði. Bakvatnið sem þegar berst meðfram vesturströndinni að vatnsopi vegfyllingarinnar er með einungis örlítið hærri súrefnisstyrk en vatnið sem út um vatnsopið hefur streymt.

Ef litið er til sama tíma en án vegfyllingar, þá liggur straumurinn út um vatnsopið nær austurjaðri þröskulds innri fjarðar, meðfram Berserkseyrarodda og sveigir aðeins í vestur vegna grynninganna þar og dregur með sér súrefnisríkari sjó úr austurhluta ytri fjarðar (Mynd 107, hægri). Straumurinn berst nær vesturströndinni og skiptist þar til suðurs og norðurs. Suðurstraumurinn verður nokkuð sterkur meðfram vesturströndinni og færir með sér súrefnisríkara vatn í rangsælis iðu sem berst suður að vatnsopi þröskuldsins. Norðurstraumurinn sveigir að hluta austur til austurhluta mynnis fjarðarins en að hluta myndar hann réttisælis iðu sem dregur með sér súrefnisríkara vatn úr austurhluta fjarðarins til hækkunar súrefnisstyrks meginstraumsins.

Munurinn sem dreginn er hér upp við lok útfalls þessa stórstraums, þegar útslag telst lágt, er vel merkjanlegur gagnvart súrefnisstyrk sjávar utan þröskulds innri fjarðar, áður en fellur aftur að. Þetta

leiðir af sér að á næsta aðfalli berst heldur súrefnissnauðari sjór inn um vatnsop vegfyllingarinnar en tilfellið er fyrir vatnsop um þröskuld innri fjarðar án tilkomu vegfyllingarinnar (Mynd 108). Lítillega breytt straumhegðun í ytri firði með tilkomu vegfyllingarinnar varnar því að straumur ýti í mun meira mæli súrefnisríkari sjó úr austurhluta ytri fjarðar til vesturstrandar hans sem síðan berst að vatnsopinu, eins og tilfellið er án vegfyllingar. Mismunur í tímaröðum súrefnisstyrk í vesturhluta ytri fjarðar (Mynd 106, grænar línur) endurspeglar vel þennan mun í súrefnisstyrk eftir því hvar vatnsop á þröskuldi innri fjarðar er staðsett.

Nokkuð breytt straumhegðun er í innri firði með tilkomu vegfyllingarinnar þar sem ein stór rangsælisdæla er ráðandi við mesta dýpi hans, en án vegfyllingar skiptist straumur í tvær nokkuð jafnar íður á því svæði, önnur réttisæl, hin rangsæl. Straumur til syðsta hluta fjarðarins er tiltölulega svipaður að sjá milli tilfellanna. Erfitt er að sjá að dreifing súrefnis í innri firði sé eitthvað óheppilegri með þetta breyttri straumhegðun, og því virðist sem minnkað súrefnisflæði vegna lægri styrks þess vatns sem úr ytri firði kemur eftir tilkomu vegfyllingar, ráði mestu um það að meðalstyrkur súrefnis í innri firði verður heldur lægri.

Lækkaður súrefnisstyrkur vestarlega í ytri firði með vegfyllingu samanborið við án hennar viðhelst fram í næsta stórstraum og leggjast súrefnisstyrksferlarnir úr viðmiðunarpunktinum (Mynd 106, grænir ferlar) saman 5. febrúar 2014. Tveimur dögum fyrr leggjast meðalsúrefnisstyrksferlar saman (Mynd 106, neðri hluti). Það sem virðist ráða mestu um að mismun milli tilfellanna er eytt og súrefnisflæði um vatnsop vegfyllingar verði það sama á nýjan leik og þegar vatnsop er austar án vegfyllingarinnar, er að sveifla stórstraumsins í byrjun febrúar er mun meiri en fyrri straums. Þetta má greina með því að skoða straumörvar sem lagðar eru ofan á reiknaðan súrefnisstyrk í firðinum bæði með og án vegfyllingar. Sambærilegt við Mynd 107 og Mynd 108 frá straumnum á undan þegar mismunar í súrefnisstyrk innri fjarðar fór að gæta, sýna Mynd 109 og Mynd 110 aðstæður í lok útfalls og lok aðfalls á stórstraumnum 1. febrúar. Straumhraði á þessum stórstraum er greinilega mun meiri en á stórstraumnum á undan. Á útfalli (Mynd 109) færir meginstraumurinn úr vatnsopi vegfyllingarinnar í ytri fjörð súrefnissnauðara vatn mun lengra út fjörðinn, alveg út í mynni hans. Mun súrefnisríkari sjór kemur með bakvatninu sem streymir eins og áður suður eftir vesturströndinni. Meiri hliðstæða er í tilfallinu án vegfyllingar og við strauminn á undan, en greinilega er þó mun meiri straumhraði og virkari súrefnisflutningur.

Á aðfallinu sem á eftir kemur færast því súrefnisríkara vatn inn um vatnsopið og mun minni munur er í straumhegðun ytri fjarðar hvort vatnsopið er vestan eða austan megin á þröskuldi innri fjarðar. Sá sterki straumur sem fylgir þessari miklu sveiflu í sjávarföllunum virðist því færa með mun virkari hætti súrefnissnauðt vatn út úr Kolgrafafirði og endurnýja fjörðinn með súrefnisríku vatni utan úr Breiðafirði.

Ætla má að mismunandi sveifla sjávarfallanna sé grunnorsökin fyrir því að munur geti verið á meðalsúrefnisstyrk innri fjarðar með og án vegfyllingar, en vindur hefur mikið með það að gera hversu mikil áhrifin verða (Mynd 104) sem og magn síldarinnar (Mynd 103).

8.5. Umhverfisaðstæður í desember 2012

Frá líkankeyrslum yfir rannsóknartímabilið má sjá að við lágan vindstyrk, mikið magn síldar og á lágum straumi má búast við auknum mun á súrefnisstöðu fjarðarins með og án vegfyllingar. Því var líkaninu beitt með einföldum hætti til að fá vísbendingu um súrefnisástand fjarðarins með og án vegfyllingar í aðdraganda fyrri síldardauðans í desember 2012. Reiknitímabilið náði frá 16. nóvember til 24. desember 2012.

Nokkrar einfaldanir voru gerðar á líkaninu í ljósi skorts á mæligögnum á þessum tíma. Notast var við fasta seltu og sjávarhita frá sondumælingum sem teknar voru 18. desember 2012. Þessi gildi á seltu og sjávarhita voru föst í tíma fyrir tímabilið sem reiknað var. Gert var ráð fyrir föstu magni síldar, þar sem 100 þúsund tonnum af síld var jafndreift á svæðin innan vegfyllingar en engin síld var sett utan vegfyllingar. Vindsvið var eingöngu myndað úr veðurlíkángögnum frá Harmonie, en til að einfalda gerð vindsviðsins var mældur vindur frá brúnni ekki notaður við myndun þess. Með þessum einföldunum er talið að líkanið geti endurspeglad hegðun súrefnis en ólíklegt er að líkanið endurspegli fullkomlega rétt súrefnisgildi, sérstaklega vegna einföldunar um ákvörðun síldar.

Mynd 111 sýnir reiknaðan 12 klst meðalsúrefnisstyrk fyrir innan vegstæðið með og án vegfyllingar í aðdraganda fyrri síldardauðans í desember 2012. Síldardauðans varð vart 14. desember 2012 (sýnt með lóðréttri brotalinu á mynd) en með föstu magni síldar má greina lægri súrefnisstyrk dagana á undan síldardauðanum með lággildi þann 11. desember 2012. Þetta getur verið til marks um að mun meira magn síldar hafi verið innan vegfyllingar þegar síldardauðinn varð samanborið við dagana á undan. Vísbending er um að síld hafi drepist í einhverjum mæli daginn áður en almennt er talið að síldardauðans hafi verið vart (Skessuhorn, frétt frá 13.12.2012; www.skessuhorn.is).

Bergmálmælingar Hafrannsóknastofnunar frá 11. og 12. desember 2012 gáfu til kynna að um 275 þúsund tonn af síld væru í Kolgrafafirði og að meirihluti þeirrar síldar væri innan vegfyllingar (sjá kafla 3.5.1). Reiknað lággildi súrefnisstyrks er þann 11. desember og lendir saman við vaxandi straum í lok smástraums sem kom á eftir stórstraumi með tiltölulega lágu útslagi. Vindur heldur áfram að falla fram á 14. desember (Mynd 88), þ.a. niðurstöður líkanreikninganna gefa til kynna að vaxandi straumur ráði meiru um að súrefnishagur vænkast fyrir sama magn af síld innan vegfyllingar. Ekki er hér tekið tillit til mögulegrar göngu síldarinnar inn og út úr innri firði, né mögulega viðveru hennar á lágsúrefnisvæði ytri fjarðar. Slík viðvera gæti haft áhrif á tímasetningu lággildis súrefnisstyrksins. Meðalsúrefnisstyrkur án vegfyllingar er heldur lægri en án hennar, sem er í samræmi við niðurstöður hér að framan, en ætla má að staðsetning brúarops hafi þar áhrif (sjá kafla 8.3).

Fljótlega eftir að síldardauða varð vart má sjá að súrefnisstyrkur eykst þrátt fyrir óbreytt magn síldar í líkaninu. Sondumælingar Hafrannsóknastofnunar frá 18. desember 2012 benda til að súrefnisstyrkur innan vegfyllingar hafi verið um 1,2 – 2 ml/l. Tímasetningin svarar til loka líkankeyrslunnar (Mynd 111). Ef lítið er til hegðunar súrefnisstyrks í líkanreikningum fyrir tímabilið má leiða að því líkum að raun súrefnisstyrkur innan vegfyllingar í Kolgrafafirði hafi því verið töluvert lægri þegar síldardauðinn átti sér stað. Vinna þyrfti frekari forsendur um dreifingu síldar í firðinum og flutning hennar milli svæða til að reyna að líkja eftir raunástandi eins og sondumælingar gefa vísbendingu um. Eftir sem áður er hægt að draga ályktanir af alvarleika umhverfisaðstæðna í aðdraganda síldardauðans og setja þær í samhengi við aðstæður sem að jafnaði ríkja í firðinum.

9. Umræða vegna hugmynda um orsakabætti súrefnisskorts

Í kjölfar síldardauðanna voru vangaveltur uppi um hvað gæti hafa valdið súrefnisskortinum sem varð til þess að síld drapst í Kolgrafafirði veturinn 2012-2013 og hvort tilkoma vegfyllingarinnar hafi ráðið þar einhverju um. Leitt var t.a.m. að því líkum af sérfræðingum Hafrannsóknastofnunar í kjölfar seinni síldardauðaatburðarins að margir samverkandi þættir geti hafi verið valdir að súrefnisþurrðinni eins og t.a.m. að svæðið innan brúar sé nokkuð einangrað frá streymi súrefnisríks sjávar að utan, að mikið lífmagn síldar gengur fljótt á súrefnisstyrkinn, að stillt veður takmarkar loftskipti andrúmslofts og

sjávar, að íspekja í innanverðum firðinum stöðvar loftskipti, og að súrefniskrefjandi niðurbrot hafi verið til staðar eftir fyrsta atburðinn (Guðmundur J. Óskarsson, 2013).

Niðurstöður þessarar rannsóknar gefa til kynna að svæðið innan brúar er ekki einangrað frá streymi súrefnisríks sjávar að utan, þar sem vatnsskipti ganga fyllilega fyrir sig og sjávarfallastraumar eiga greiða leið um fjörðinn. Hins vegar verður styrkur lágur utan brúarops vestanmegin í ytri firði og súrefnisríkt vatn úr Breiðafirði dugar ekki til fullnægjandi endurnýjunar súrefnis í Kolgrafafirði þegar straumur er lágur, lágvindsaðstæður ríkja og síldargöngur eru miklar. Ástandið er þannig ekki bundið við innri fjörðinn heldur gengur vesturhluti ytri fjarðar fyllilega í takt við þessa súrefnishnignun. Á þetta sér stað óháð því hvort vegfyllingin sé til staðar.

Rannsóknin staðfestir að mikið lífmagn síldar gengur fljótt á súrefnisstyrkinn, og má sjá að hún er alveg ráðandi þáttur gagnvart þeim aðstæðum sem skapast. Enn fremur er staðfest að stillt veður takmarkar loftskipti um yfirborð sjávar og að það séu þær umhverfisaðstæður sem hvað mestan þátt eiga í að til súrefnisskorts geti komið við síldargöngur. Einnig sýna niðurstöður rannsóknarinnar að staða sjávarfalla er umhverfisþáttur sem einnig getur ráðið töluverðu um aðstæður, sérstaklega gagnvart því hvort lágsúrefnissvæði í vestanverðum ytri firði er viðhaldið eða það brotið á bak aftur.

Ekkert mat var á lagningu íss í Kolgrafafirði á rannsóknartímabilinu, en leitt var að því líkum í kjölfar síldardauðanna að lagning íss gæti stöðvað loftskipti. Lofthiti í byrjun desember 2013 var um -10°C en yfirborðshiti sjávar fór minnst í um -1°C , aðstæður til lagningar íss voru því mögulega til staðar, en mæling hitastigsins fer fram um 25 cm undir yfirborðinu og er því ekki mæling á lægsta hitastigi þegar kólnun er ríkjandi. Mælingar fóru ekki fram syðst í firðinum þar sem kæling gæti mögulega verið meiri. Ólíklegt þykir þó að ís hafi lagt í nægilegu magni til að hafa veruleg áhrif á súrefnisflæði um yfirborð þar sem enga afbrigðilega svörun má greina í mældum súrefnisstyrk á þessum tíma. Ekki eru þó súrefnismælingar syðst úr firðinum til mats á þessu. Vel tókst að endurskapa mælingar á rannsóknartímabilinu í líkani án þess að taka beint tillit til slíkra ferla. Jafnframt er ólíklega að ís hafi lagt á fjörðinn í desember 2012 þar sem lofthiti var meiri þá en í desember 2013. Einnig mátti sjá mjög afgerandi áhrif af magni síldar og umhverfisþáttanna tveggja, lágs vinds og stöðu sjávarfalla, og mátti leiða að því líkum að það væru meginþættirnir sem höfðu áhrif á súrefnisskortinn í desember 2012 sem leiddi til síldardauða.

Ekki var hægt að sýna fram á að lágvindsaðstæður rétt í aðdraganda 1. febrúar 2013, þegar seinna síldardauðans varð vart, væru líkleg orsök dauðans. Greining á flutningshraða súrefnis og möguleikanum til að endurnýja súrefnisbirgðir fjarðarins gefa ekki til kynna að vindur hafi verið sérstaklega lágur á þessum tíma og að súrefnisendurnýjun um yfirborð hafi verið eitthvað takmörkuð, nema þá daginn fyrr, að áður gengnum sterkum vindi í nokkra daga. Hins vegar má sjá að nokkrum dögum fyrr hafi staðið yfir lágvindstímabil sem líklegt er til að hafa leitt til lágs súrefnisstyrks í firðinum, þótt ekki teljist það alveg eins slæmt vindástand eins og í aðdraganda fyrri síldardauðans.

Vegna fyrri síldardauðaatburðar var hins vegar súrefniskrefjandi niðurbrot til staðar í aðdraganda seinni síldardauðans. Hugsa mætti sér að sú viðbótarsúrefnisupptaka samhliða súrefnisupptöku lifandi síldar á lágvindstímabili í aðdraganda 25. janúar 2013 hefði getað leitt til síldardauða af samsvarandi orsökum og 13. desember 2012. Þáttur smástraums í báðum tilfellum getur einnig hafa ráðið einhverju.

Síldardauði 25. janúar myndi þar af leiðandi passa ágætlega inn í þá mynd sem hér hefur verið dregin upp af helstu orsakabáttum súrefnisskorts sem leitt getur til síldardauða. Hins vegar eru vitni að síldardauðanum 31. janúar (sjá kafla 6), þ.a. orsakir súrefnisskorts verða að teljast ókunnar þar sem síldardauðinn átti sér stað í kjölfar nokkurra daga hávindstímabils sem féll saman við stórstraum.

Kvörðun á bakgrunnssúrefnisupptöku í vatnsgæðalíkaninu gefur vísbendingu um að bakgrunnssúrefnisupptaka sé hærrí innan vegfyllingar en utan hennar. Þessi munur gæti einfaldlega skýrst með því að meiri súrefnisupptaka sé við botn fjarðarins innan vegfyllingar en utan vegna síldardauðanna. Þetta styður við það að rotnun síldar við botn hafi, ásamt miklu magni síldar, átt þátt í seinni síldardauðann í lok janúar 2013. Ekki liggja fyrir forsendur til að meta hvort rotnandi síld hafi flust úr innri firði í vesturhluta ytri fjarðar, og leitt til enn lakari aðstæðna þar. Slíkt gæti hafa ýtt frekar undir súrefnishnignun í innri firði og mögulega átt þátt í síldardauðaatburðinum í lok janúar 2013.

Með hliðsjón af niðurstöðum rannsóknarinnar eru engar vísbendingar um suma af þeim orsakabáttum sem hugmyndir voru uppi um í aðdraganda rannsóknarverkefnisins. Þannig er ekkert sem bendir til þess að súrefnisnautt botnvatn hafi verið til staðar í innri firðinum í aðdraganda fyrri síldardauðaatburðarins í desember 2012, vegna rotnandi þörunga eða annars lífríkis, mögulega í kjölfar ofauðgunar, né vegna annarra ferla eins og flutning brennisteinsvetnis með jarðvarmavatni, en ekki var talið útilokað að brennisteinsvetnisblandað vatn stigi til sjávar í Kolgrafafirði og gæti m.a. haft eiturvirk áhrif á lífríki. Frumrannsóknir hlutlausra sporefna í reiknilíkani bentu til að þessi kenning væri ólíkleg þar sem uppspretta mengaða vatnsins væri sennilegast við Berserkseyri en hlutlaus sporefni frá Berserkseyri þynnist hratt út og hefði ólíklega getað ollið þeirri mengun sem þyrfti til að valda síldardauða. Engar vísbendingar eru um sprungumyndanir í botni Kolgrafafjarðar sem gætu ollið slíkri mengun og var því ekki farið í ítarlegri rannsóknir á mengun vegna þessa. Jafnframt gáfu reikningar vatnsgæðalíkansins til kynna fyrir þær umhverfisaðstæður sem ætla má að hafi verið til staðar í desember 2012 að hið mikla magn síldar geti fyllilega skýrt súrefnishnignunina þó svo ekki er hægt að fullyrða um hvers vegna einungis 10% af þeirri síld sem talin er að hafi verið á ferðinni hafi drepist.

Að sama skapi gefa niðurstöður rannsóknarinnar til kynna að þáttur fasamunar sjávarfalla yfir mynni Kolgrafafjarðar og viðvarandi réttisælis straums í tengslum við hann, er hverfandi og jafnvel enginn, og því ekki um að ræða einhver takmörkun vatnsskipta í innri firðinum vegna þessa. Í raun gefa niðurstöður til kynna að takmörkun vatnsskipta eru engin, hins vegar má sjá að staðsetning vatnsops á þröskuldi innri fjarðar getur haft með að segja hversu lágur súrefnisstyrkur verður þar sem súrefnisrýrra vatn er að jafnaði til staðar vestan megin í ytri firði þegar fjörðurinn er undir álagi mikillar súrefnisupptöku og endurnýjun er takmörkuð.

Áhrif vindstrauma, þ.e. sjávarstrauma tilkomna vegna vindálags, er merkjanlegt í firðinum, en nokkuð jafnt hvort sem vegfyllingin er til staðar eða ekki. Helstu áhrif þeirra er að lækka heldur meðalsúrefnisstyrk í innri firði væntanlega þar sem þeir halda á móti lágsúrefnisvæðinu í vesturhluta ytri fjarðar og dempa sveiflur sem annars sjávarfallastraumar bera með sér. Áhrif þessa á súrefnishnignun við síldargöngur er þó minniháttar í samhengi við áhrif vindstyrks á súrefnisendurnýjun um yfirborð, sveiflu sjávarfalla og magni síldar á göngu.

10. Möguleg greining á virkni mótvægisgerða

Yfirlit Hafrannsóknastofnunar um síldargöngur sumargotssíldarinnar gefur til kynna að göngur í sunnanverðum Breiðafirði hafi aðallega átt sér stað á árunum 2006-2014, og að viðvera hennar hafi verið lítil síðastliðinn vetur (Sólveig R. Ólafsdóttir o.fl., 2014; Svavar Hávarðsson, 2015). Fjölmargar lýsingar eru á viðveru síldarinnar á misjöfnum stöðum frá þessum tíma á vegum fréttaveitu Vesturlands, Skessuhorns (www.skessuhorn.is), sem og á fleiri miðlum. Sérstaklega hefur hún verið í miklum mæli í Grundarfirði og er greint frá mati fiskifræðinga upp á allt að milljón tonn í firðinum (grein Skessuhorns frá 17.10.2007).

Sögulega virðast síldargöngur í Kolgrafafirði vera algengar (Kvótinn, 2013; Kristján Hjaltason, 1951). Hvort síldin sé líkleg til að snúa aftur í Kolgrafafjörð í miklum mæli er óvíst, en ef svo skyldi verða má draga ályktanir úr þeirri rannsókn sem hér er greint frá um hvaða aðstæður eru líklegar að verða hvað erfiðastar gagnvart súrefnisbúskap fjarðarins. Jafnframt liggur fyrir vatnsgæðalíkan sem nýta má til að greina virkni mögulegra mótvægisáðgerðir til varnar síldardauða. Ljóst má vera af framangreindum niðurstöðum að mótvægisáðgerðir myndu ekki snúa beint að veru vegfyllingarinnar heldur hvernig hægt væri að milda þær umhverfisaðstæður sem til staðar væru og helst áhrif hafa á súrefnisbúskapinn.

Ýmsar hugmyndir voru uppi um mögulegar mótvægisáðgerðir í kjölfar síldardauðanna. Sumar snéru að því að bæta súrefnisbúskap fjarðarins, aðrar einblíndu á leiðir til að varna ferð síldar í innri fjörð og enn aðrar um hvernig fæla megi síldina út úr firðinum ef hún ratar þangað inn og áhyggjur eru uppi um súrefnisstyrk sjávar.

Breytingar á vegfyllingunni voru til skoðunar bæði gagnvart bættum súrefnishag fjarðarins og við eina mjög afgerandi leið til varnar inngöngu síldar í innri fjörð, að loka brúaropinunni og varna gangi sjávar í innri fjörð. Slík áðgerð mun leiða til umtalverðra umhverfisáhrifa sem liggja vel utan þeirrar afmörkunar sem rannsóknaverkefninu hefur verið sett. Engu að síður mætti nota vatnsgæðalíkanið til fjölþættrar greiningar á slíkum aðstæðum.

Breytingar á vegfyllingunni sem snúa að rofi hennar með einhverjum hætti eða flutningi brúarops væri hæglega hægt að skoða með því líkani og aðferðarfræði sem kynnt hafa verið hér, en hafa væntanlega lítið upp á sig þar sem vegfyllingin breytir engu um að óhagstæðar aðstæður skapast fyrir síldina þegar hún gengur í fjörðinn í miklum mæli við óheppilegar umhverfisaðstæður.

Af niðurstöðum rannsóknarinnar má þegar ráða að færsla brúarops til austurs, þar sem núverandi brúaropi yrði lokað og nýtt opnað austar, gæti skilað lítillægri aukningu í súrefnisstyrk við óhentugar umhverfisaðstæður þegar súrefnisupptaka er mikil í firðinum. Þessi framkvæmd myndi í besta falli valda sambærilegum súrefnisstyrk og var fyrir vegfyllingu, og er því ólíkleg til að útiloka síldardauða við miklar síldargöngur.

Þær mótvægisáðgerðir sem væntanlega væri raunhæfast að skoða snúa að bættum súrefnishag fjarðarins við miklar síldargöngur og hvernig best væri að standa t.a.m. að loftíblöndun eða súrefnisblöndun svo að hún skilaði sem bestum árangri fyrir sem minnstan tilkostnað.

11. Helstu niðurstöður

11.1. Óhagstæðar umhverfisaðstæður í Kolgrafafirði við síldargöngur

Niðurstöður við greiningu mæligagna og líkangerð eins og greint er frá að framan sýna að sjávarfallastraumar eiga greiða leið um fjörðinn og full og óheft vatnsskipti eru milli ytri og innri fjarðar (sjá kafla 5.1, 5.2 og 8.1). Hins vegar verður súrefnisstyrkur lágur utan brúarops vestanmegin í ytri firði og súrefnisríkt vatn úr Breiðafirði dugar ekki til fullnægjandi endurnýjunar súrefnis í Kolgrafafirði þegar straumur er lágur, lágvindsaðstæður ríkja og síldargöngur eru miklar (sjá kafla 5 og 8). Ástandið er þannig ekki bundið við innri fjörðinn heldur gengur vesturhluti ytri fjarðar fyllilega í takt við þessa súrefnishnignun. Á þetta sér stað óháð því hvort vegfyllingin sé til staðar.

Mikið magn síldar gengur fljótt á súrefnisstyrkinn, og verður þetta ráðandi þáttur gagnvart þeim aðstæðum sem skapast. Stíllt veður takmarkar loftskipti um yfirborð sjávar og eru það umhverfisaðstæður sem eiga hvað mestan þátt í að til súrefnisskorts geti komið við síldargöngur. Staða sjávarfalla er umhverfisþáttur sem einnig getur ráðið töluverðu um aðstæður, sérstaklega gagnvart því hvort lágsúrefnissvæði í vestanverðum ytri firði er viðhaldið eða það brotið á bak aftur, eins og fjallað er um í kafla 5.6.

Sveiflur í súrefnisstyrk á lágsúrefnissvæðinu í vesturhluta ytri fjarðar fylgja að mestu sveiflum í innri firði. Súrefnisstyrkur fellur því meir sem súrefnisupptaka vegna síldar er meiri, endurnýjun súrefnis um yfirborð er minni og sveifla sjávarfalla er minni.

11.2. Alvarleiki umhverfisaðstæðna við liðna síldardauðaatburði og líkur á óhagstæðari aðstæðum

Ef reiknaður súrefnisstyrkur fyrir desember 2012 í aðdraganda fyrri síldardauðans (Mynd 111) er borinn saman við súrefnisstyrk í lok janúar 2014 fyrir sama magn síldar (sjá Mynd 103, 100 þús. tonn) má sjá að töluvert verri aðstæður voru til staðar í lok janúar 2014. Lægsti súrefnisstyrkur í lok janúar 2014 er um 1,6 ml/l samanborið við 2,9 ml/l í aðdraganda síldardauðans með vegfyllingu. Án vegfyllingar er lægsti styrkur 2,0 ml/l í lok janúar 2014 samanborið við 3,2 ml/l í desember 2012. Vegna þessa má leiða að því líkum að óháð vegfyllingu hefði síldardauði verið líklegur í janúar 2014 ef það magn síldar sem var til staðar í Kolgrafafirði í desember 2012 hefði verið þá til staðar.

Síldardauðinn í desember 2012 varð við tiltölulega sjaldgæfar aðstæður þar sem frekar lágur vindur varaði lengi á sama tíma og síldin flyktist í fjörðinn (kafla 6). Sem lággildisaðstæður að vetri voru þessar aðstæður þó ekkert sérstaklega slæmar ef borið er saman við þá 10 vetur sem veðurgögn er til frá Kolgrafafjarðarbrú (sjá kafla 7). Verstu aðstæður veturinn á undan voru reyndar mun betri, en álíka magn síldar er talið hafa farið um fjörðinn þá og ekki er vitað til að síld hafi drepist.

Verstu veðuraðstæður veturinn þar á undan, 2010-2011, voru hins vegar miklu verri, og þær verstu yfir 10 ára tímabil veðurraðar á Kolgrafafjarðarbrú. Leiða má að því líkum að ef síldin hefði haft vetursetu þennan veturinn í Kolgrafafirði í sama mæli og veturna tvo á eftir, og verið til staðar á þeim lágvinstíma, þá gæti hafa orðið síldardauði sem væri mun umfangsmeiri en raunin varð í desember 2012, sérstaklega ef það hefði fallið saman við lágan sjávarfallastraum.

Í grein Skessuhorns frá 12.3.2012 (www.skessuhorn.is) er vitnað í Bjarna Sigurbjörnsson bónda á Eiði, um að mikið magn af síld hafi drepist í fjörinni veturinn 2010-2011 og illan daun hafi lagt um fjörðinn, sérstaklega þegar hitnaði í veðri um vorið. Telur Bjarni að sýking í síldinni hafi átt hluta að máli. Ekki liggur fyrir tímasetning á þessum síldardauða og því ekki unnt að meta með hliðsjón af framangreindum niðurstöðum um líklegar óhagstæðar umhverfisaðstæður þennan vetur, hvort mögulega lágur súrefnisstyrkur hafi eitthvað haft um þennan síldardauða að gera ef síldin hefur gengið í fjörðinn í nægjanlegu magni.

Tafla 7 sýnir að lágvindsaðstæður hafi skapast alla vetur frá 2005-2006, að undanskildum veturnum 2011-2012 og 2014-2015, sem geta mögulega hafa verið verri en þær sem sköpuðust veturinn 2012-2013 þegar síldin drapst. Ef haft er í huga að vetursetustöðvar íslensku sumargotssíldarinnar frá 2006 til 2013/2014 voru að stórum hluta í sunnanverðum Breiðafirði (Sólveig R. Ólafsdóttir o.fl., 2014), má telja það mildi að síldin hafi ekki dvalið í verulegu magni innan brúar í Kolgrafafirði fyrr en veturinn 2011-2012.

Leiða má að því líkum að mjög heppilegt var að síldin snéri til Kolgrafafjarðar árið eftir síldardauðann, meðan rannsóknin fór fram, í mun minna mæli en árið á undan, því verstu lágvindsaðstæður þá voru öllu verri og sjálfsagt þær þriðju verstu af síðustu 10 árum. Ætla má að síldardauði vegna súrefnisskorts hefði orðið mun umfangsmeiri við þær aðstæður samanborið við árið á undan ef síldin hefði gengið í jafnmiklum mæli og árin tvö á undan.

Verstu lágvindsaðstæður síðasta vetrar voru þau ákjósanlegustu síðustu 10 ár og reyndi ekki á hvort súrefnishnignun yrði á þeim tíma í firðinum. Mælingar Hafrannsóknastofnunar í desember 2014 gáfu til kynna að einungis 10 þúsund tonn af síld væri þar (Svavar Hávarðsson, 2015). Í anda þess breytileika sem verið hefur í vetursetustöðvum íslensku sumargotssíldarinnar, en síðustu áratugi hefur hún haldið sig ýmist fyrir austan eða vestan land á grunnsævi eða dýpra úti landgrunninu (Sólveig R. Ólafsdóttir o.fl., 2014), telur Hafrannsóknastofnun að síldin hafi væntanlega fundið sér annan meginstað til vetrardvala.

Ekki er unnt að framkvæma lengri tíma greiningu á veðurlagi m.v. aðrar veðurstöðvar t.d. Stykkishólm þar sem Kolgrafafjörður verður gjarnan í svo miklu skjóli í austlægum áttum, þegar aðstæður virðast vera hvað erfiðastar þar gagnvart súrefnisendurnýjun um yfirborð sjávar. Til þess þyrfti langtíma-veðurlíkansröð á álíka hárrí upplausn og hér var stuðst við.

11.3. Áhrif vegfyllingar á súrefnisskort í Kolgrafafirði

Niðurstöður gefa til kynna að áhrifin af vegfyllingunni sem slíkri eru ekki merkjanleg í súrefnisbúskapi Kolgrafafjarðar að öðru leyti en því að val á staðsetningu vatnsopsins hefur áhrif á hversu virkt samspil innri fjarðar og lágsúrefnissvæðis ytri fjarðar verður þegar óhagstæðar umhverfisaðstæður fara saman með mikill upptöku súrefnis í innri firði (sjá kafla 8). Ræður þar í grunninn hversu lágur sjávarfalla-straumurinn er, en lágur vindstyrkur og mikið magn síldar ákvarða hversu mikill munurinn verður.

Staðsetning vatnsopsins í vesturenda vegfyllingarinnar eins og útfært hefur verið í Kolgrafafirði leiðir til virkara samspils en ef vatnsopið væri í austurenda, og þannig nær því sem aðstæður voru fyrir hendi áður en fjörðurinn var þveraður. Mismunurinn í meðalsúrefnisstyrk innri fjarðar sem reiknast milli þessara tveggja tilfella er hins vegar stærðargráðu minni en það fall sem verður í meðalsúrefnisstyrk í innri firði vegna viðveru síldarinnar (Mynd 100, Mynd 103).

Þetta má sjá frekar með því að horfa til þess tímabils sem leiddi til lægsta súrefnisstyrks í innri firði meðan á rannsókninni stóð, þ.e. í lok janúar 2014, og hvernig meðalsúrefnisstyrkur í innri firði reiknast fyrir fast magn síldar (Mynd 103). Mismunur í lágildi með og án vegfyllingar er um 0,1 – 0,4 ml/l, hærra eftir því sem meira er til staðar af síld. Fallið í meðalstyrk með viðveru síldar miðað við að engin síld er til staðar er hins vegar um 1,6 – 4,8 ml/l, án vegfyllingar, þ.e. stærðargráðu hærra. Hlutfall mismunarins af þessu falli minnkar eftir því sem magn síldar eykst. Magn síldar hefur þannig afgerandi áhrif á það fall sem verður í meðalsúrefnisstyrk innri fjarðar en staðsetning vatnsopsins milli innri og ytri fjarðar getur hnikað því falli um stærðargráðu nálægt 10%.

12. Samantekt og niðurlag

Umfangsmikill síldardauði átti sér stað í Kolgrafafirði veturinn 2012-2013. Talið er að samanlagt um 50 þús. tonn af síld hafi drepist í tveimur atburðum með eins og hálfmánaðar millibili. Í hvorum atburði drapst um 10% af þeirri síld sem áætlað er að hafi verið á ferð um fjörðinn. Talið er að síldardauðinn hafi orsakast af súrefnisskorti. Í kjölfar þessara atburða kom Vegagerðin á fót rannsóknarverkefni til að varpa frekara ljósi á þá. Markmiðið var að greina umhverfisaðstæður í firðinum sem gætu haft áhrif

á súrefnisbúskap fjarðarins þegar hann er undir miklu álagi vegna súrefnisupptöku síldar. Jafnframt, ef slíkar aðstæður skapast, að meta hvort tilkoma vegfyllingar Snæfellsnesvegjar við Hjarðarbólsodda hefði áhrif á eða leiddi til þessara aðstæðna. Vettvangsmælingar voru framkvæmdar í samstarfi við Hafrannsóknastofnun og reiknilíkön voru byggð og notuð til stuðnings greiningar mæligagna, og til mats á áhrifum umhverfisaðstæðna og vegfyllingarinnar á súrefnisbúskap fjarðarins.

Ítarleg gögn hafa fengist til mats á umhverfisaðstæðum í Kolgrafafirði. Jafnframt hefur uppsetning og aðlögun straumfræðilegra líkana og vatnsgæðalíkans af Breiðafirði leitt af sér hentug tól til framan- greindra greininga. Niðurstöðum straumlíkans ber vel saman við mælda sjávarhæð og –strauma. Vegna skorts á gögnum um dreifingu, magn og súrefnisupptöku síldar var notast við jafndreifða, svæðisbundna dreifingu síldar. Magn síldar á hverjum tíma var síðan áætlað með hliðsjón af fastri súrefnisupptöku á einingarþyngd síldar við aðlögun reikninga að mældum súrefnisstyrk. Niðurstöðum vatnsgæðalíkans ber almennt vel saman við mældan súrefnisstyrk í Kolgrafafirði og áætluðu magni síldar ber vel saman við þær stærðargráður er bergmálmælingar Hafrannsóknastofnunar gefa til kynna.

Greining vettvangsmælinga og beiting reiknilíkana hefur leitt í ljós orsakasamhengi veðurfars-, straum- og vatnsgæðabátta í Kolgrafafirði, sérstaklega að vetri þegar síldargöngur eru líklegastar. Vindstillur geta ríkt í firðinum, jafnvel í skjóli ríkjandi austlægra vindátta í Breiðafirði. Breytileiki sjávarfalla-strauma er mikill í firðinum og straumhegðun flókin. Súrefnisstyrkur í Kolgrafafirði er m.a. háður því hvernig vindafar fer saman við stöðu sjávarfalla, og getur gengið hratt á súrefni fjarðarins ef mikið magn síldar er til staðar í firðinum.

Niðurstöður vatnsgæðalíkans benda til þess að eftir vesturströnd Kolgrafafjarðar utan vegfyllingar sveiflast súrefnisstyrkur að mestu í takti við breytingar í súrefnisstyrk innan vegfyllingar þegar súrefnis- upptaka er mikil í firðinum og endurnýjun súrefnis er lítil um yfirborð sjávar og með sjávarföllum. Þannig getur súrefnisstyrkur fallið á nokkuð stóru svæði í vesturhluta ytri fjarðar samhliða falli í innri firði, og samspil þessara svæða með vatnsskiptum um þröskuld innri fjarðar getur leitt til stigminnkaðs súrefnisstyrks á báðum stöðum. Helstu umhverfisaðstæður sem hafa áhrif á þetta samband eru vind- styrkur og varandi lágvindstímabila, og sveifla sjávarfalla með jafnan lægri styrk súrefnis þegar hún er lág. Mesta flóðhæð á stórstraumi ræður einnig miklu um hversu mikið súrefnishagur vænkast á þessu vestursvæði ytri fjarðar, og um leið í innri firði.

Líkönnum var beitt fyrir sömu umhverfisaðstæður, með og án vegfyllingar, fyrir tímabilið október 2013 – apríl 2014 til að meta áhrif vegfyllingarinnar á straumhegðun og súrefnisbúskap Kolgrafafjarðar. Niðurstöður sýna að vegfyllingin hefur engin áhrif á að súrefnisstyrkur í vesturhluta ytri fjarðar sveiflist í takti við breytingar í innri firði og að samspil svæðanna geti leitt til stigminnkaðs súrefnisstyrks á báðum stöðum, öll einkenni eru þau sömu með og án vegfyllingar. Hins vegar getur staðsetning vatnsops við þröskuld innri fjarðar ráðið nokkru um hversu mikið súrefnisstyrkur fellur í innri firði við síldargöngur.

Þannig veldur staðsetning brúarops vegfyllingarinnar vestarlega í firðinum virkari vatnsskiptum við vesturhluta ytri fjarðar. Jafnframt breytist straumhegðun í vesturhluta ytri fjarðar nægjanlega til að endurnýjun súrefnis við vesturströnd ytri fjarðar með súrefnisríkara vatni úr austurhluta fjarðar og í mynni hans minnkar. Súrefnissnauðara vatn berst þannig í innri fjörð um vatnsop vegfyllingarinnar á aðfalli og heldur súrefnissnauðara vatn berst síðan á næsta útfalli til vesturhluta ytri fjarðar, og þannig getur súrefnisstyrkur stigminnkað bæði innan og utan vegfyllingar með gangi sjávarfallanna en ef vatnsopið væri austar.

Súrefnisstyrkur getur þannig fallið heldur meira að meðaltali innan vegfyllingar með vegfyllingu heldur en án hennar þegar síld gengur í miklum mæli í fjörðinn, vindhraði er lágur og lágstreymt er. Mismunurinn er þó stærðargráðu minni en fall súrefnisstyrks verður vegna síldargangnanna.

Óvíst er hvort aðeins hærra meðalsúrefnisstyrkur í innri firði, án vegfyllingarinnar, hefði varnað því að 10% þeirrar síldar sem var á ferðinni drapst í desember 2012, þar sem tímasetning á miklum síldargöngum samfara óhentugum umhverfisaðstæðum virðist ráða mestu um hvort að til súrefnishnignunar geti komið í Kolgrafafirði. Magn síldar sem er á ferðinni ræður svo því hversu lágt súrefnisstyrkur fellur og hvort síldin hafi þá nægjanlegt súrefni og rými til að varna afföllum. Niðurstöður verkefnisins benda til þess að mun verri umhverfisaðstæður hafi skapast undanfarin ár en raunin varð í desember 2012. Má því teljast mildi að síldargöngur í jafn miklum mæli hafi ekki farið saman við svo óhagstæðar umhverfisaðstæður í Kolgrafafirði. Tilkoma vegfyllingarinnar breytir engu um það.

Heimildir

- Deltares, 2014[1]. *Delft3D: Hydro-Morphodynamics*. Notendahandbók, útgáfu nr. 3.15.33641.
- Deltares, 2014[2]. *D-Water Quality: Water Quality and Aquatic Ecology*. Notendahandbók, útgáfu nr. 4.99.33647.
- Egbert, G.D., S.Y. Erofeeva, 2002. *Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 19(2), 183-204.
- Guðmundur J. Óskarsson, 2012. Grunnævi sem búsvæði síldar og sitthvað um Breiðafjarðardvöl hennar. Ráðstefna Hafrannsóknastofnunarinnar um grunnsævir, 30. mars 2012 (<http://www.hafro.is/grunnsaevi-radstefna/GlaerurVeggdjold/Gudm.Oskars.sild.pdf>).
- Guðmundur J. Óskarsson, 2013. Hafró svarar: Margir samverkandi þættir sem ollu þessu. Fréttastofa RÚV, 2. Feb. 2013 og 6. feb. 2013 (www.spyr.is/grein/ruv/1586).
- Hafrannsóknastofnun, 2007. Rannsóknir á fiskidauða í Grundarfirði. Fréttatilkynning frá 19. janúar 2007 (<http://www.hafro.is/prenta.php?ID=19&nanar=1REF=3&fID=4599>).
- Herring, G., 2002. Fish kill in the Gulf of Oman. A space-based diagnosis. NASA Earth Observatory (www.earthobservatory.nasa.gov/Features/oman/).
- ÍSOR, 2004. Hitaveita fyrir Grundarfjörð í sjónmáli. Fréttir ÍSOR, 22. mars 2004 (www.isor.is).
- Johnstone, A.D.F., Wardle, C.S. og Almatar, S.M., 1993. *Routine respiration rates of Atlantic mackerel, Scomber scombrus L., and herring, Clupea harengus L., at low activity levels*. Journal of Fish Biology 42, 149-151
- Kristján Hjaltason, 1951. Síldveiðar við Grundarfjörð og nágrenni. Þjóðviljinn 16(192): 3-7 (http://timarit.is/view_page_init.jsp?pageld=2759018).
- Kvótinn, 2013. Síld hefur áður drepist og verið veidd á Kolgrafafirði. 28.11.2013 (<http://kvotinn.is/sild-hefur-adur-drepist-og-verid-veidd-a-kolgrafafirdi/>).
- Luther, G.W., S. Ma, R. Trouwborst, B. Glazer, M. Blickley, R.W. Scarborough, M.G. Mensinger, 2004. The roles of anoxia, H₂S, and storm events in fish kills of deep-end canals of Delaware inland bays. Estuaries vol. 27 no. 3 p. 551-560.
- Macy III, W.K., Durbin, A.G. og Durbin, E.G., 1999. *Metabolic rate in relation to temperature and swimming speed, and the cost of filter feeding in Atlantic menhaden, Brevoortia tyrannus*. Fishery Bulletin 97, 282-293
- Mannvit, 2014. *Sjávarhæð og yfirborðshiti í Kolgrafafirði*. Unnið fyrir Vegagerðina. Skýrsla nr. MV 2014-041, nóvember 2014.
- Sea-Bird Electronics, 2012. *SBE 37-SMP-ODOD MicroCAT*. Notendahandbók.
- Sólveig R. Ólafsdóttir, Alice Benoit-Cattin, Héðinn Valdimarsson, Magnús Danielsen, Guðmundur J. Óskarsson og Þorsteinn Sigurðsson, 2013. Vatnsgæði í Kolgrafafirði í kjölfar síldardauða. Veggspjald, Umhverfismengun á Íslandi, vatn og vatnsgæði. Áhrif vatnsnýtingar, landnýtingar og mengunar í vatni og sjó. 22. mars 2013.

Sólveig R. Ólafsdóttir, Þorsteinn Sigurðsson, Guðmundur J. Óskarsson og Héðinn Valdimarsson, 2014. Vöktun í Kolgrafafirði í kjölfar síldardauða. Málstofa Hafrannsóknastofnunar 22. maí 2014.

Stauffer, B.A., A.G. Gellene, A. Schnetzer, E.L. Seubert, C. Obert, G.S. Sukhatme, D.A. Caron, 2012. An oceanographic, meteorological, and biological 'perfect storm' yields a massive fish kill. *Marine Ecology Progress Series*, vol. 468: 231-243.

Svavar Hávarðsson, 2015. Kolgrafafjörður laus við síld. *Vísir*, 19.01.2015 (<http://www.visir.is/kolgrafafjordur-laus-vid-sild/article/2015701199947>).

Teledyne, 2007. *WorkHorse Monitor/Sentinel User's Guide*. Notendahandbók.

Vatnaskil, 2001. *Straumlíkan af Kolgrafafirði*. Unnið fyrir Vegagerðina. Skýrsla nr. 01.08, mars 2001.

Vatnaskil, 1998. *AquaSea: Tidal flow in estuaries and coastal areas, lake circulation, transport modelling*. Notendahandbók.

Vogt, P.R., 1989. Volcanogenic upwelling of anoxic nutrient-rich water: A possible factor in carbonate-bank/reef demise and benthic faunal extinctions? *The Geological Society of America Bulletin* v. 101 no. 10 p.1225-1245 (gsabulletin.gsapubs.org/content/101/10/1225.abstract).

Wanninkhof. 1992. Relationship Between Wind Speed and Gas Exchange Over the Ocean. *Journal of Geophysical Research*. Vol.97.No.C5.

Ærtebjerg, G., Andersen, J.H. & Hansen, O.S. (eds.), 2003. *Nutrients and Eutrophication in Danish Marine Waters, A Challenge for Science and Management*. National Environmental Research Institute. 126 pp.

Töflur

Tafla 1. Veðurstöðvar í Kolgrafafirði.

Stöð	Hnit (ISNET93)		Upphaf	Endir	Tíðni mælinga
	X [m]	Y [m]			
Geislunarmælir	304847	501935	8.10.2013 23:29	11.11.2014 11:00	30 sek
Botn	306551	495839	18.7.2013 13:20	24.05.2015 00:00 ¹	10 mín
Brú	305267	502611	25.1.2005 16:00	24.05.2015 00:00 ¹	10 mín
Eiði	303429	500207	17.7.2013 04:00	24.05.2015 00:00 ¹	10 mín
Kolgrafir	306451	500639	18.7.2013 18:00	24.05.2015 00:00 ¹	10 mín

¹ Veðurstöðvar enn starfrækar við útgáfu þessarar skýrslu.

Tafla 2. Sjávarhæðarmælar í Kolgrafafirði.

Stöð	Hnit (ISNET93)		Upphaf	Endir	Tíðni mælinga
	X [m]	Y [m]			
H1	307474	506470	26.6.2013	17.9.2014	5 sek / 1 mín
H2	310721	507071	1.7.2013	17.9.2014	5 sek / 1 mín
H3	305469	503667	3.7.2013	17.9.2014	5 sek / 1 mín
H4	304236	499900	24.6.2013	17.9.2014	5 sek / 1 mín

Tafla 3. Yfirborðshitamælar í Kolgrafafirði.

Stöð	Hnit (ISNET93)		Upphaf	Endir	Tíðni mælinga
	X [m]	Y [m]			
Y1	307480	506359	3.7.2013	19.9.2014	5 sek
Y2	310618	506545	1.7.2013	14.3.2014	5 sek
Y3	305411	503563	3.7.2013	19.9.2014	5 sek
Y4	303653	500500	3.7.2013	19.9.2014	5 sek
Y5	306090	500567	3.7.2013	19.9.2014	5 sek
Y6	306034	497378	3.7.2013	19.9.2014	5 sek
Y7	305092	502415	3.7.2013	11.11.2014	5 sek

Tafla 4. Straumsjármælar í Kolgrafafirði.

Stöð	Hnit (ISNET93)		Upphaf	Endir	Tíðni mælinga	Skráð botndýpi
	X [m]	Y [m]				
HNA	305652	501671	15.5.2013 14:43	3.11.2013 18:00	30 mín	14,4 m
HFS	305143	501258	15.5.2013 08:00	29.7.2013 15:30	30 mín	37 m
HSV	304826	500853	29.7.2013 17:17	6.12.2013 09:47	30 mín	18 m
HFV	305589	499034	15.1.2014 15:14	25.4.2014 12:14	30 mín	27 m ¹
HFA	306129	499604	15.1.2014 15:01	25.4.2014 12:31	30 mín	27 m ¹

¹ Uppgefið dýpi er 27 m fyrir HFV og HFA en þrýstingsmæling sýnir tæplega 1 m mun á mælingum, dýpra í HFV.

Tafla 5. MicroCAT síritamælar og nettengdur súrefnismælir.

Stöð	Hnit (ISNET93)		Upphaf	Endir	Tíðni mæling a	Skráð botndýpi
	X [m]	Y [m]				
HNA	305652	501671	15.5.2013 14:43	3.11.2013 18:00	10 mín	14,4 m
HFS	305143	501258	15.5.2013 08:00	29.7.2013 15:30	10 mín	37 m
HSV	304826	500853	29.7.2013 17:17	6.12.2013 09:47	10 mín	18 m
HFV	305589	499034	15.1.2014 15:14	25.4.2014 12:14	10 mín	27 m ¹
HFA	306129	499604	15.1.2014 15:01	25.4.2014 12:31	10 mín	27 m ¹
L1e	304798	500949	28.7.2013 20:15	25.4.2014 08:41	5 mín	16 m
L1n	304798	500949	28.7.2013 07:17	25.4.2014 08:44	5 mín	16 m
L2e	305644	501441	28.7.2013 20:10	25.4.2014 11:08	5 mín	15 m
L2n	305644	501441	28.7.2013 19:44	25.4.2014 08:31	5 mín	15 m
L3e	305537	498896	28.7.2013 19:18	25.4.2014 08:02	5 mín	22,5 m
L3m	305537	498896	28.7.2013 19:56	25.4.2014 08:03	5 mín	22,5 m
L3n	305537	498896	28.7.2013 20:03	25.4.2014 08:04	5 mín	22,5 m
Nettengdur mælir	305380 ²	499157 ²	20.11.2013 14:30	14.5.2014 14:00	10 mín	23 m ²

¹ Uppgefið dýpi er 27 m fyrir HFV og HFA en þrýstingsmæling sýnir tæplega 1 m mun á mælingum, dýpra í HFV.

² Áætluð gildi.

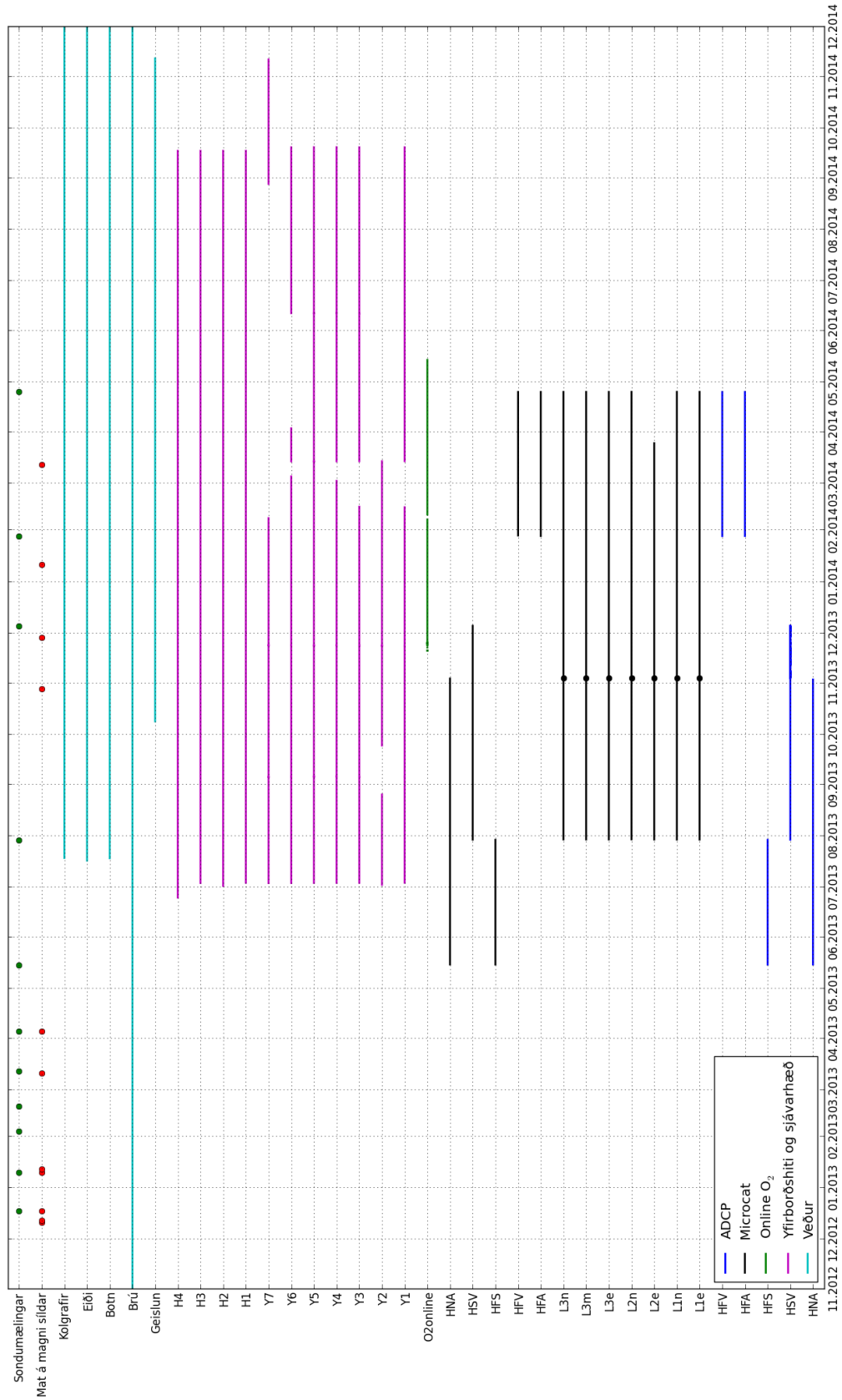
Tafla 6. Veðurstöðvar í Breiðafirði.

Stöð/Nr.	Heiti	Upphaf	Endir	Tíðni mælinga
3	Holtavörðuheiði	1.6.2007 00:00	15.4.2014 15:00	10 mín.
5	Steingrímsgjarðarheiði	1.6.2007 00:00	15.4.2014 15:30	10 mín.
13	Hálfván	1.6.2007 00:00	15.4.2014 14:50	10 mín.
22	Fróðarheiði	1.6.2007 00:00	15.4.2014 14:40	10 mín.
27	Kleifaheiði	1.6.2007 00:00	15.4.2014 15:20	10 mín.
37	Brattabrekka	1.6.2007 00:00	15.4.2014 14:20	10 mín.
39	Ennisháls	1.6.2007 00:00	15.4.2014 14:30	10 mín.
44	Hraunsmúli	1.6.2007 00:00	15.4.2014 15:00	10 mín.
48	Klettsháls	1.6.2007 00:00	15.4.2014 15:20	10 mín.
51	Laxárdalsheiði	1.6.2007 00:00	15.4.2014 15:30	10 mín.
55	Vatnaleið	1.6.2007 00:00	15.4.2014 16:00	10 mín.
56	Svínadalur	1.6.2007 00:00	15.4.2014 16:00	10 mín.
73	Króksfjörður	16.7.2009 13:30	15.4.2014 14:40	10 mín.
78	Miklidalur	11.12.2009 15:40	15.4.2014 15:30	10 mín.
80	Þröskuldur	26.11.2009 15:10	15.4.2014 16:10	10 mín.
85	Stórholt	12.7.2011 14:20	15.4.2014 15:50	10 mín.
97	Hjallaháls	27.9.2012 22:00	15.4.2014 14:50	10 mín.
167	Bláfeldur	1.1.2007 09:00	10.6.2014 12:00	3 klst
178	Stykkishólmur	1.1.1949 03:00	10.6.2014 12:00	3 klst
195	Ásgarður	1.1.2007 06:00	10.6.2014 12:00	3 klst
1919	Gufuskálar	1.1.2007 01:00	10.6.2014 14:00	1 klst
1924	Ólafsvík	1.1.2007 01:00	10.6.2014 14:00	1 klst
1936	Bláfeldur	1.1.2007 01:00	10.6.2014 14:00	1 klst
1938	Grundarfjörður	14.11.2003 11:00	10.6.2014 14:00	1 klst
2050	Stykkishólmur	1.8.2002 21:00	10.6.2014 14:00	1 klst
2175	Ásgarður	1.1.2007 01:00	10.6.2014 13:00	1 klst
2266	Reykhólar	1.1.2007 01:00	10.6.2014 14:00	1 klst
2304	Bjargtangar	1.1.2007 01:00	10.6.2014 14:00	1 klst
2315	Lambavatn	13.10.2007 03:00	10.6.2014 14:00	1 klst
2319	Patreksfjörður	1.1.2007 01:00	10.6.2014 14:00	1 klst

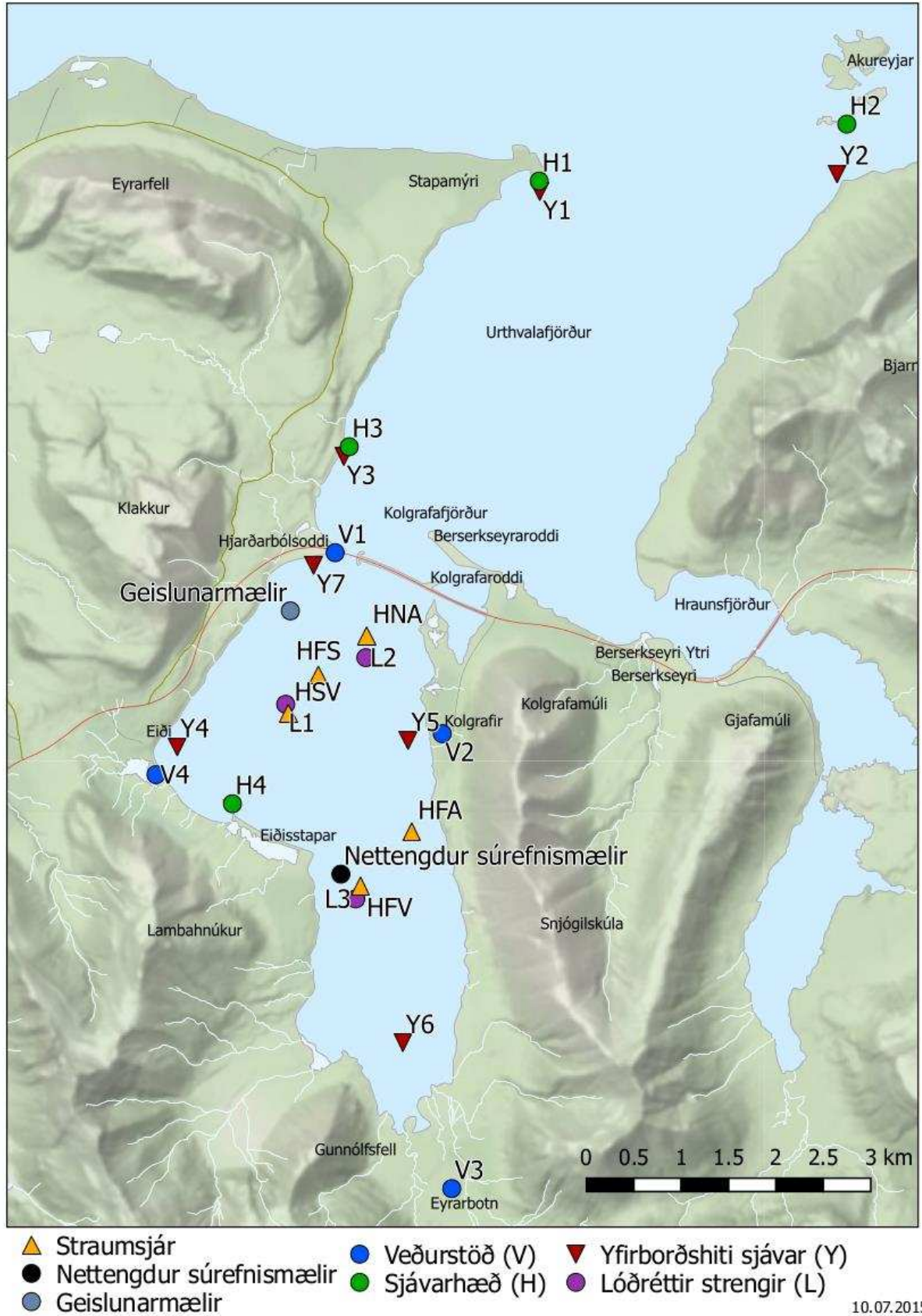
Tafla 7. Lægsti meðalvindstyrkur (lágmark) hvers vetrar 2005/2006 til 2014/2015 yfir mismunandi meðaltalstímabil, raðaður í vaxandi röð.

Röð	Meðaltalstímabil											
	2 dagar		3 dagar		4 dagar		5 dagar		10 dagar		20 dagar	
	Lágm	Ár	Lágm	Ár	Lágm	Ár	Lágm	Ár	Lágm	Ár	Lágm	Ár
1	0,8	2010	1,3	2010	1,6	2009	1,9	2009	3,2	2013	4,2	2010
2	1,2	2006	1,4	2009	1,6	2010	2,2	2010	3,3	2010	5,1	2008
3	1,3	2009	1,8	2013	2,2	2013	2,5	2013	3,4	2008	5,2	2007
4	1,4	2013	1,9	2006	2,5	2006	2,9	2008	3,8	2009	5,3	2012
5	1,6	2007	2,2	2007	2,7	2007	2,9	2006	4,1	2006	5,4	2013
6	1,6	2012	2,4	2005	2,8	2005	3,1	2005	4,4	2007	5,5	2009
7	1,9	2008	2,6	2008	2,8	2008	3,3	2007	4,6	2005	5,6	2006
8	2,1	2011	2,7	2012	3,5	2012	4,0	2012	4,8	2012	5,8	2011
9	2,3	2014	3,4	2011	4,2	2011	4,5	2011	5,2	2011	5,9	2005
10	2,3	2005	3,9	2014	5,2	2014	5,9	2014	7,2	2014	7,1	2014

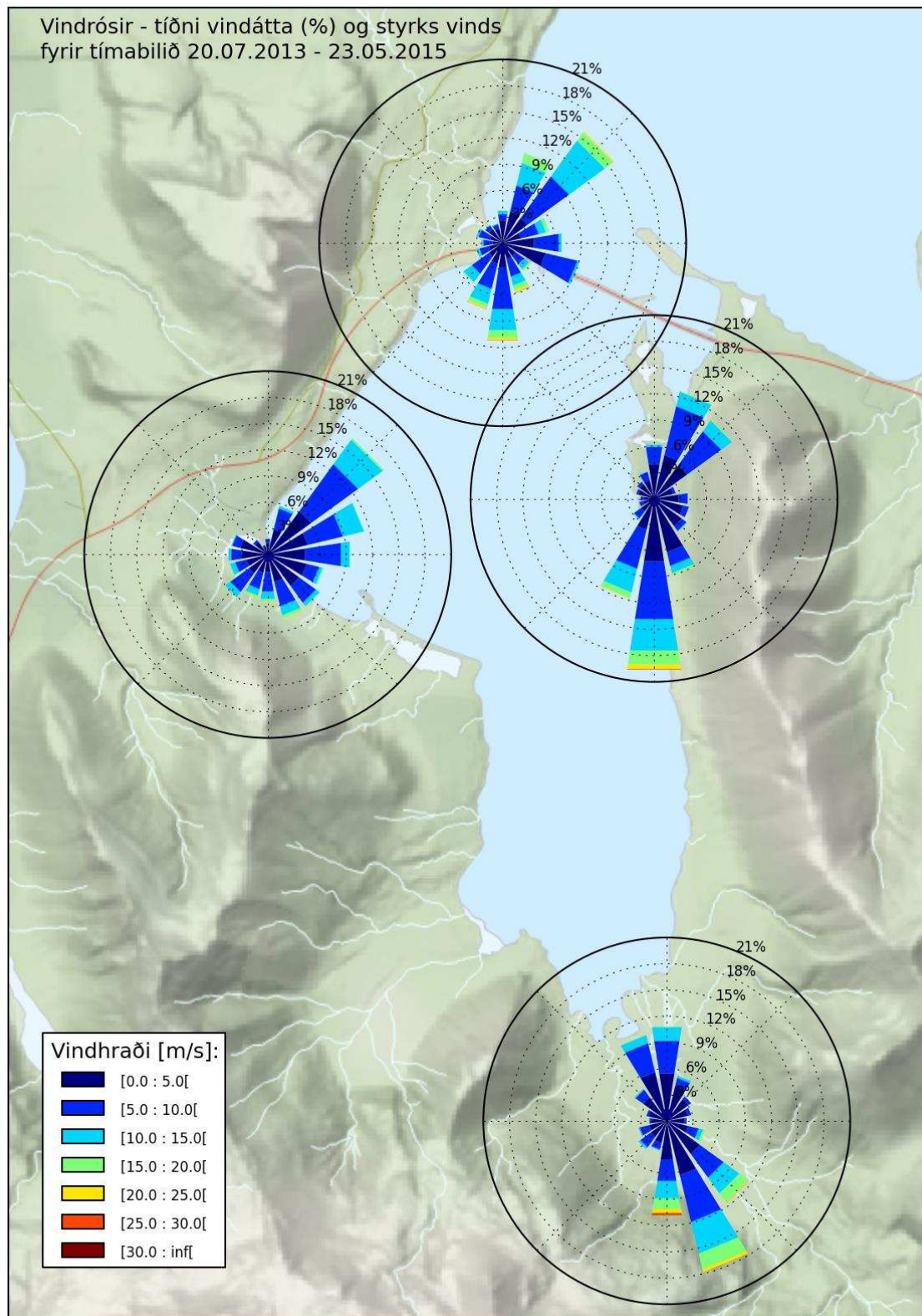
Myndir



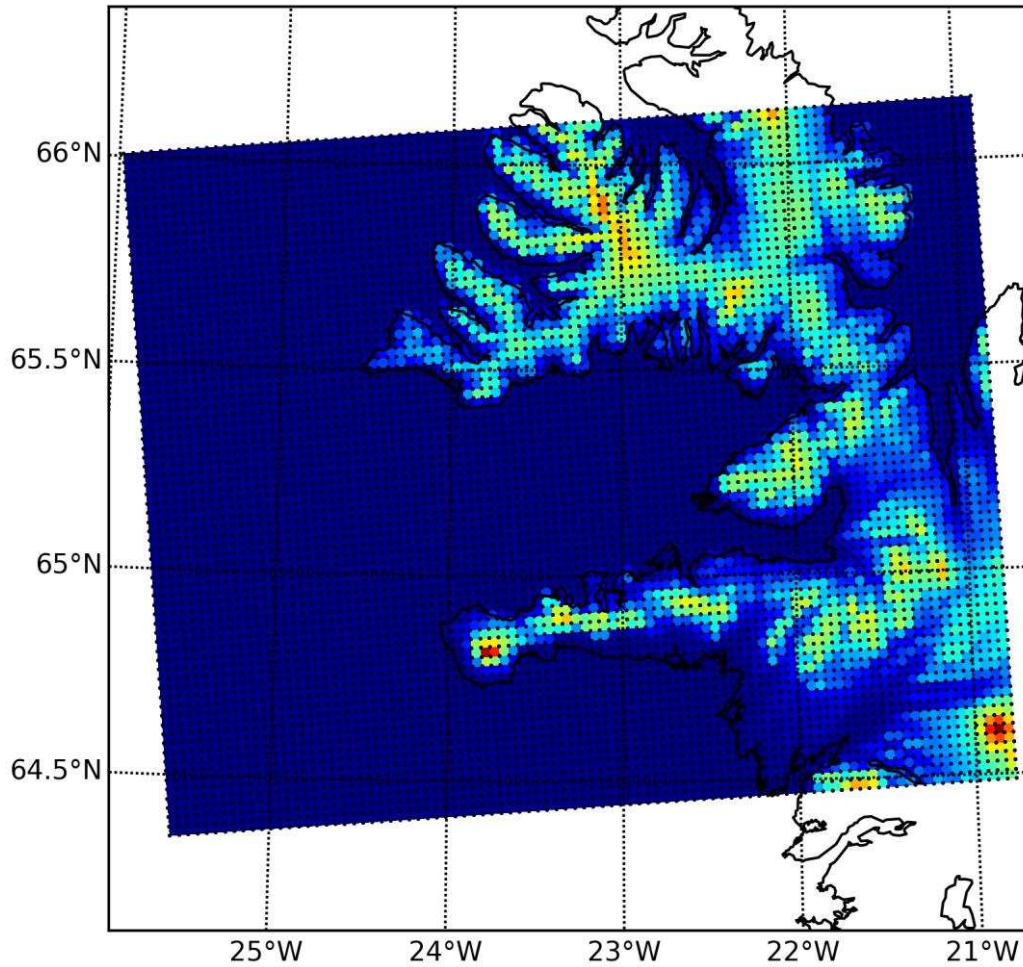
Mynd 1. Yfirlit gagna og mælitímabil. Línur tákna samfeldar mælingar en punktar tákna stakar mælingar (punktar í MicroCAT mælingum sýna hvenær mælarnir voru þjónustaðir).



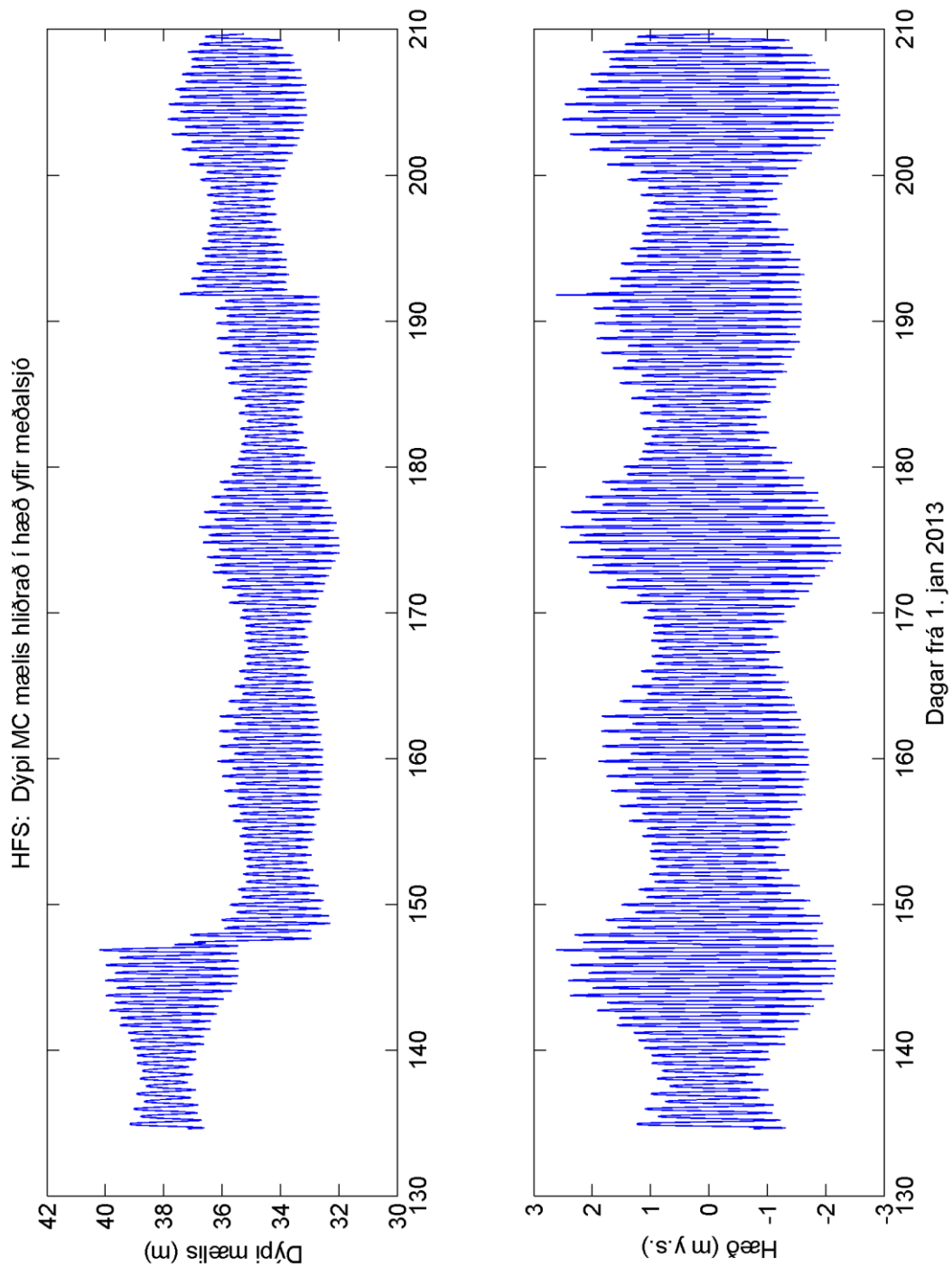
Mynd 2. Kolgrafafjörður, staðsetning mælistöðva.



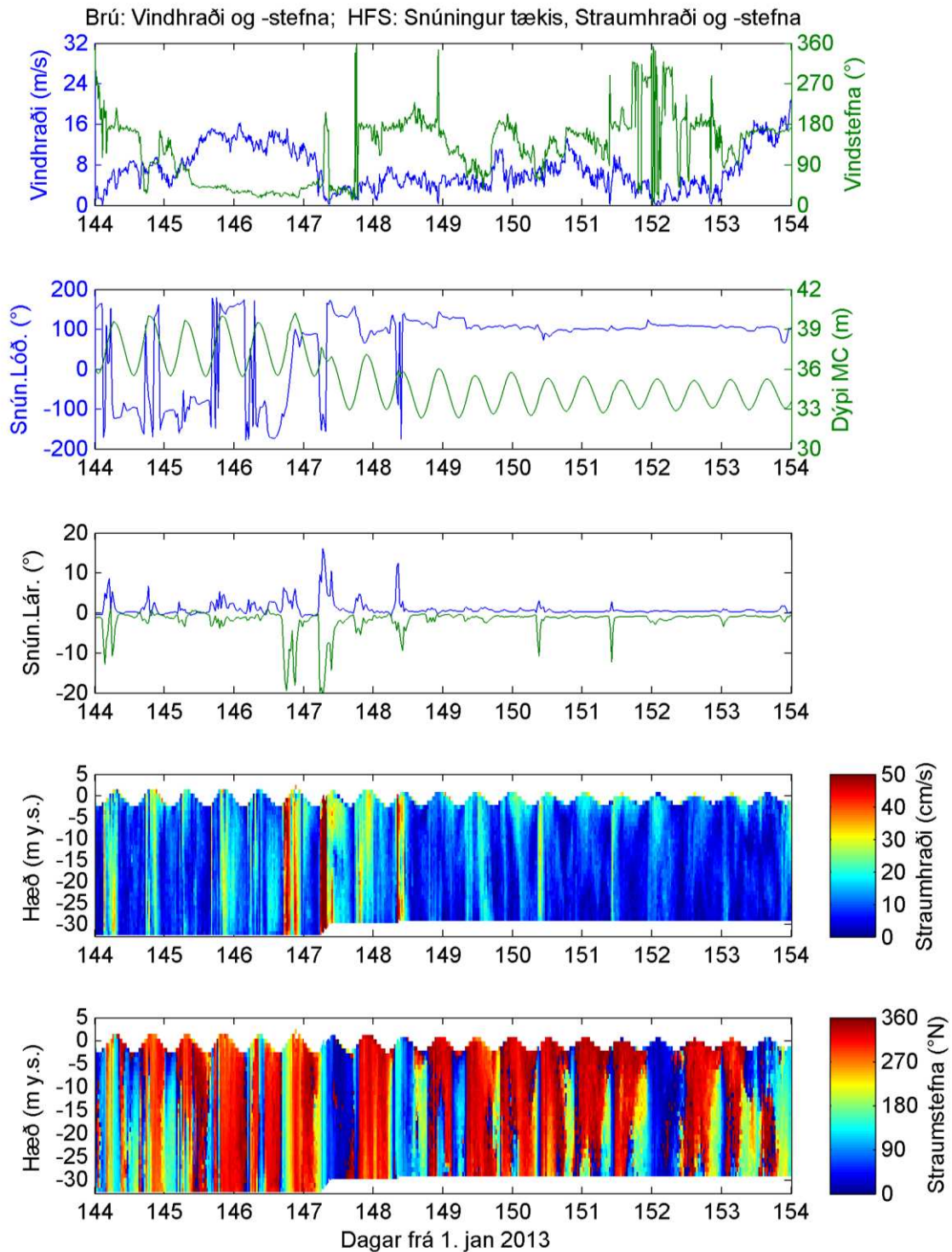
Mynd 3. Vindrósir fyrir veðurstöðvar í Kolgrafafirði fyrir mælitímabilið 20.7.2013 til 23.5.2015.



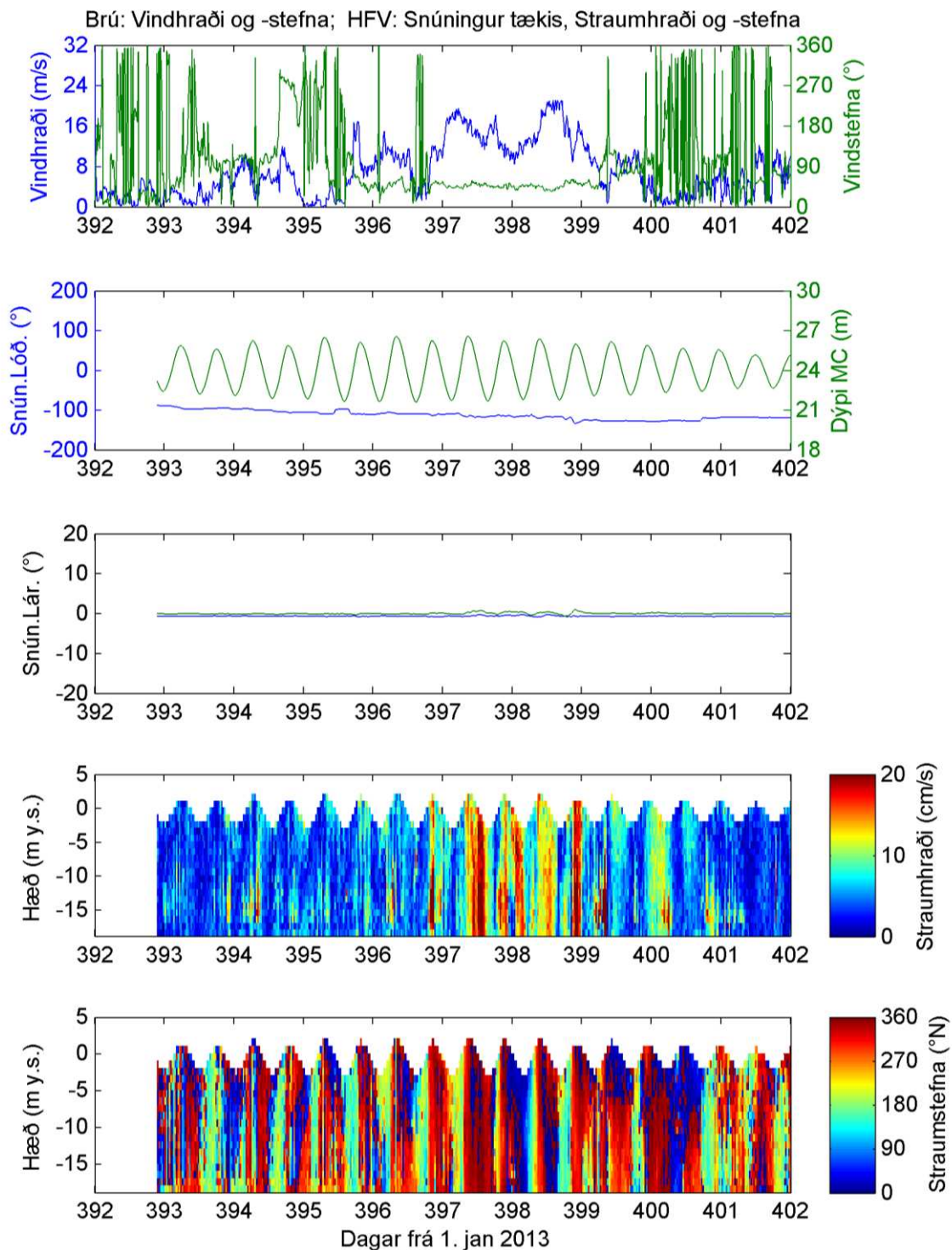
Mynd 4. Reiknipunktur Harmonie veðurlíkansins, fyrir þau gögn sem afhent voru af Veðurstofu Íslands. Litaskalinn sýnir landhæð innan Harmonie frá meðalsjó (blátt) að tæplega 1100 m y.s. (rautt).



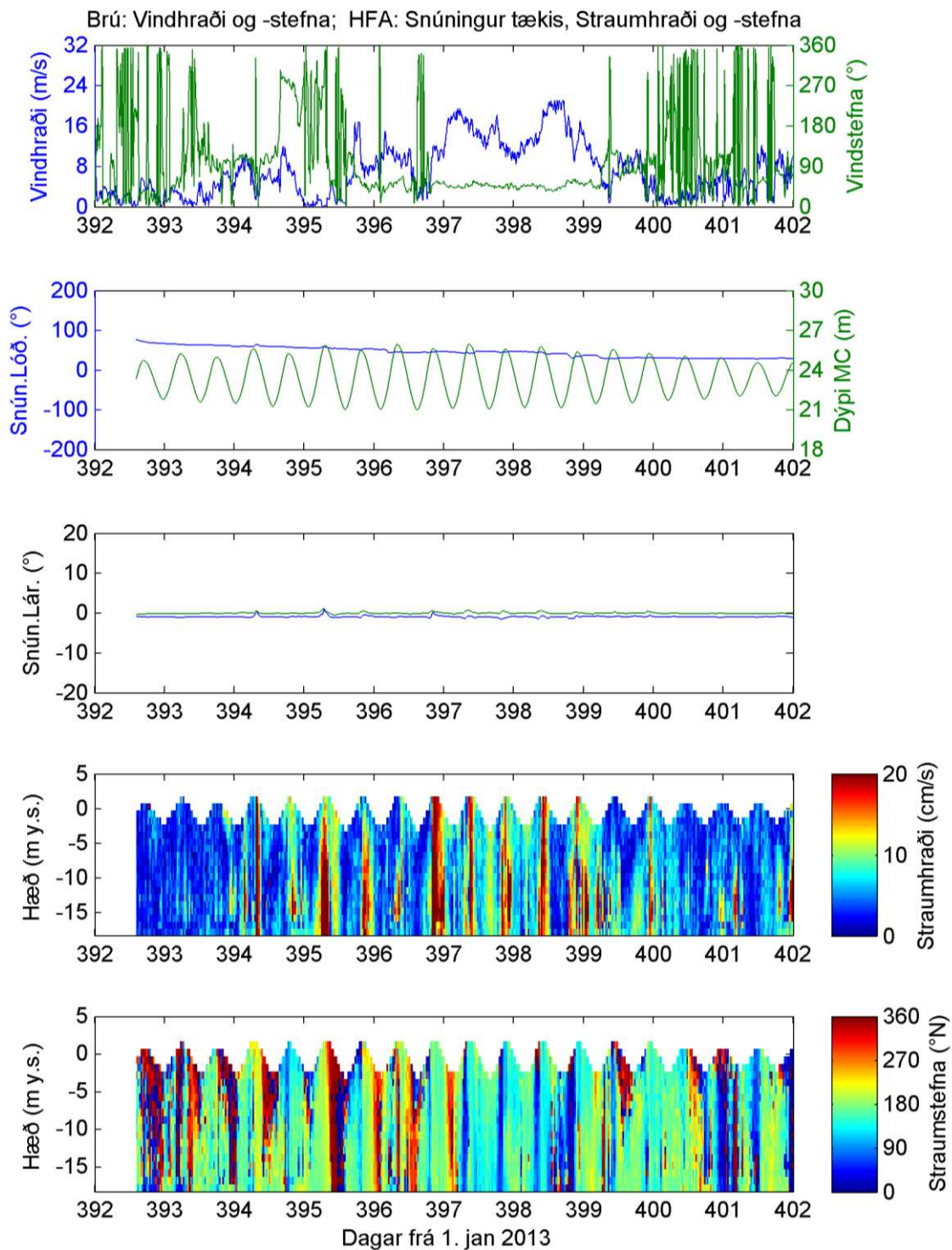
Mynd 5. Dýpi MicroCAT mælis á lögnum HFS út frá mældum þrýstingi, hita og seltu (efra graf) fært yfir í hæð yfir meðalsjó (neðra graf).



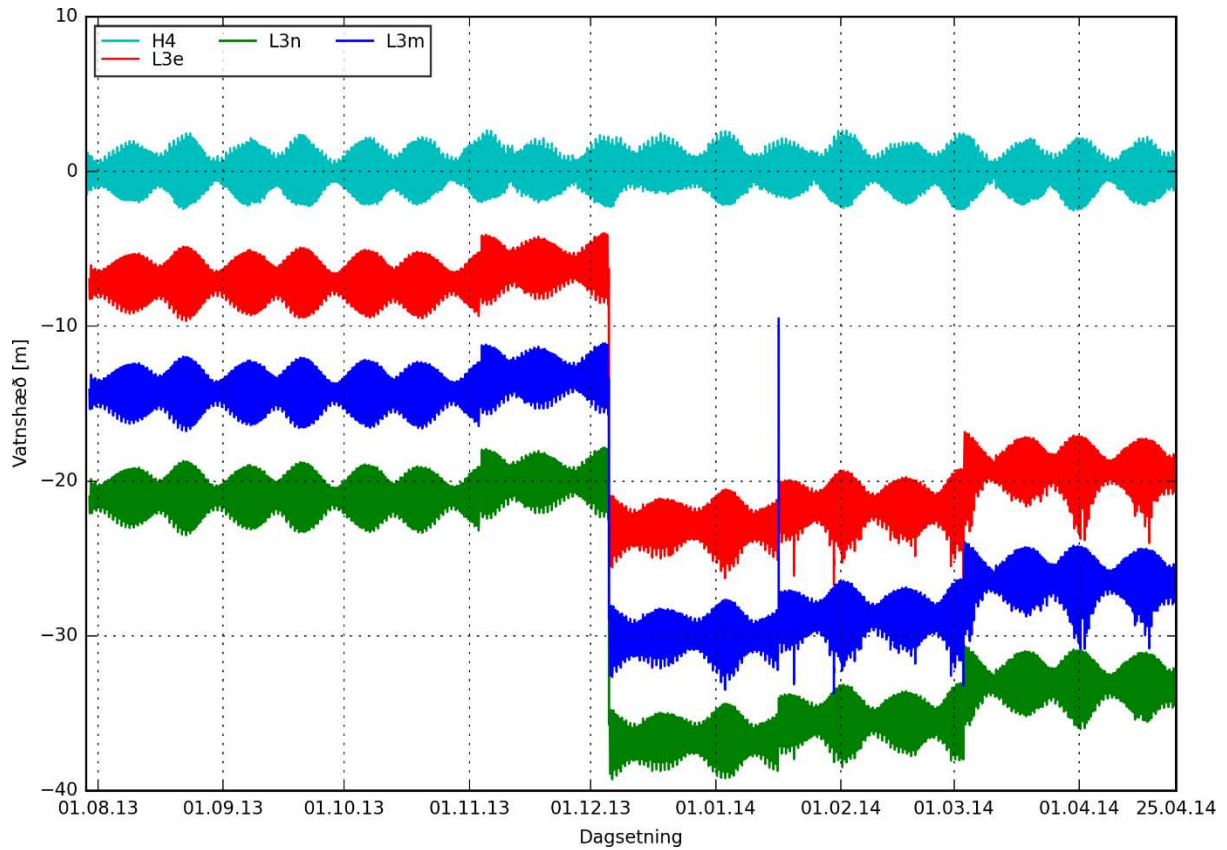
Mynd 6. Niðurstöður ADCP straummælis á lögn HFS yfir tímabil þar sem færsla var á lögninni. Til viðmiðunar sýnir efsta graf vindhraða og –stefnu á Kolgrafafjarðarbrú, auk þess sem dýpi MC mælis á lögninni er sýndur á næstefsta grafi ásamt snúningi ADCP mælis um lóðréttan ás. Snúningur ADCP mælis um láréttan ás er á miðjugrafi og þau tvö neðstu sýna mældan straumhraða og –stefnu miðað við hæð yfir meðalsjó.



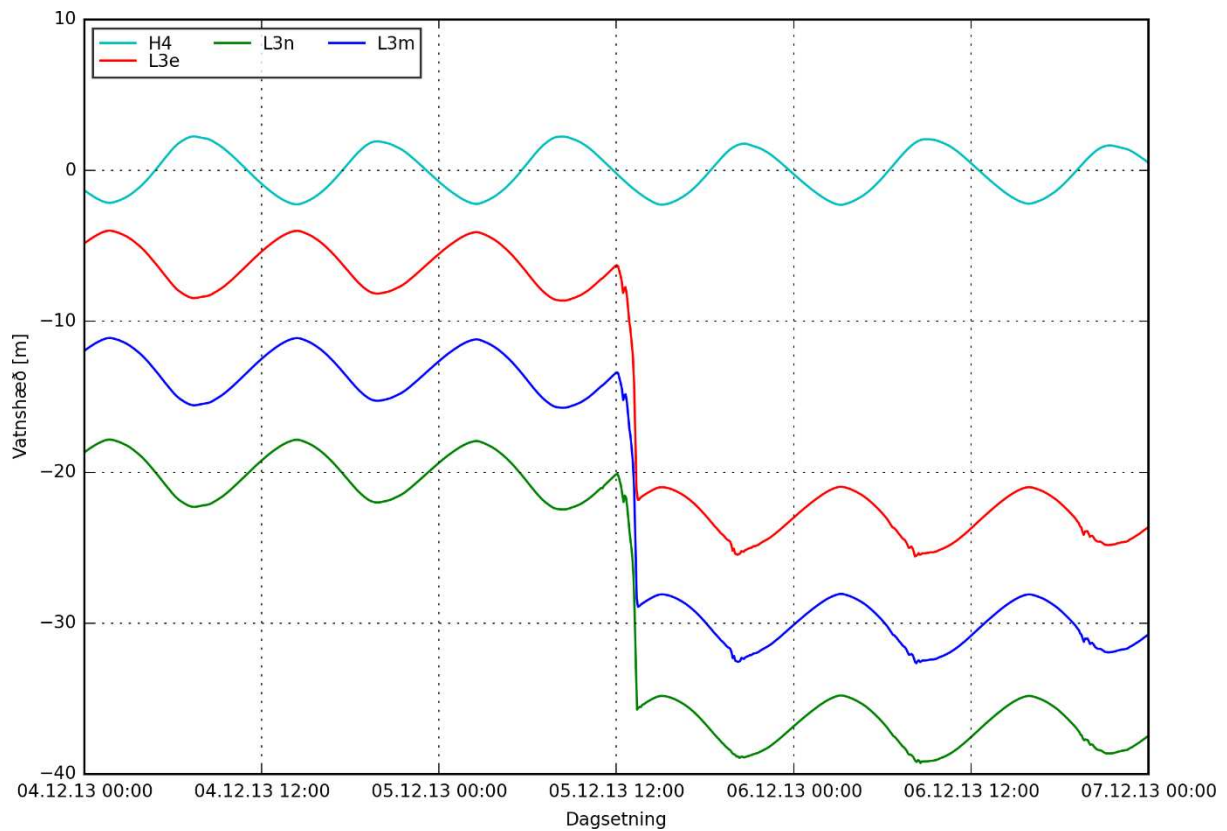
Mynd 7. Niðurstöður ADCP strømmælis á lögn HFV yfir 10 daga tímabil 28. jan. 2014 til 7. feb. 2014. Til viðmiðunar sýnir efsta graf vindhraða og -stefnu á Kolgrafafjarðarbrú, auk þess sem dýpi MC mælis á lögninni er sýndur á næstefsta grafi ásamt snúningi ADCP mælis um lóðréttan ás. Snúningur ADCP mælis um láréttan ás er á miðjugrafi og þau tvö neðstu sýna mældan strømmhraða og -stefnu miðað við hæð yfir meðalsjó.



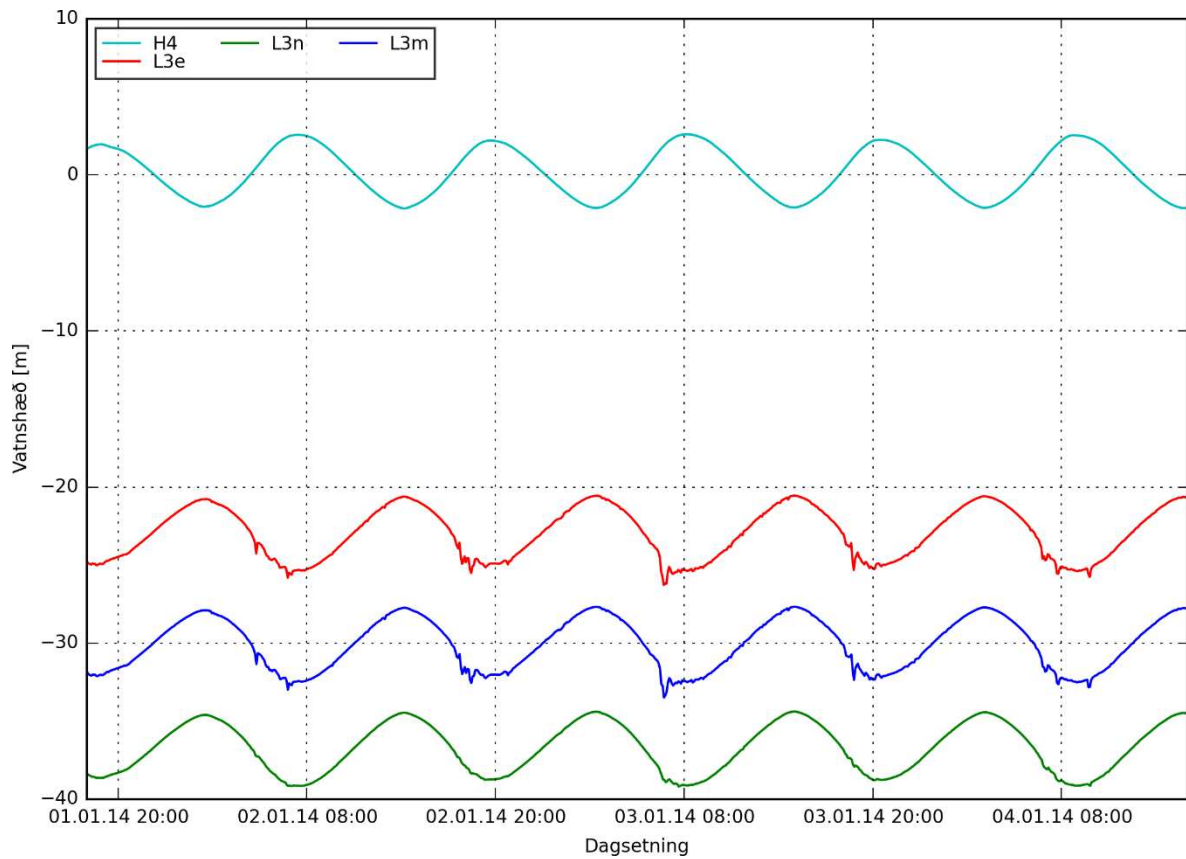
Mynd 8. Niðurstöður ADCP straummælis á lögn HFA yfir 10 daga tímabil 28. jan. 2014 til 7. feb. 2014. Til viðmiðunar sýnir efsta graf vindhraða og -stefnu á Kolgrafafjarðarbrú, auk þess sem dýpi MC mælis á lögninni er sýndur á næstefsta grafi ásamt snúningi ADCP mælis um lóðréttan ás. Snúningur ADCP mælis um láréttan ás er á miðjugrafi og þau tvö neðstu sýna mældan straumhraða og -stefnu miðað við hæð yfir meðalsjó.



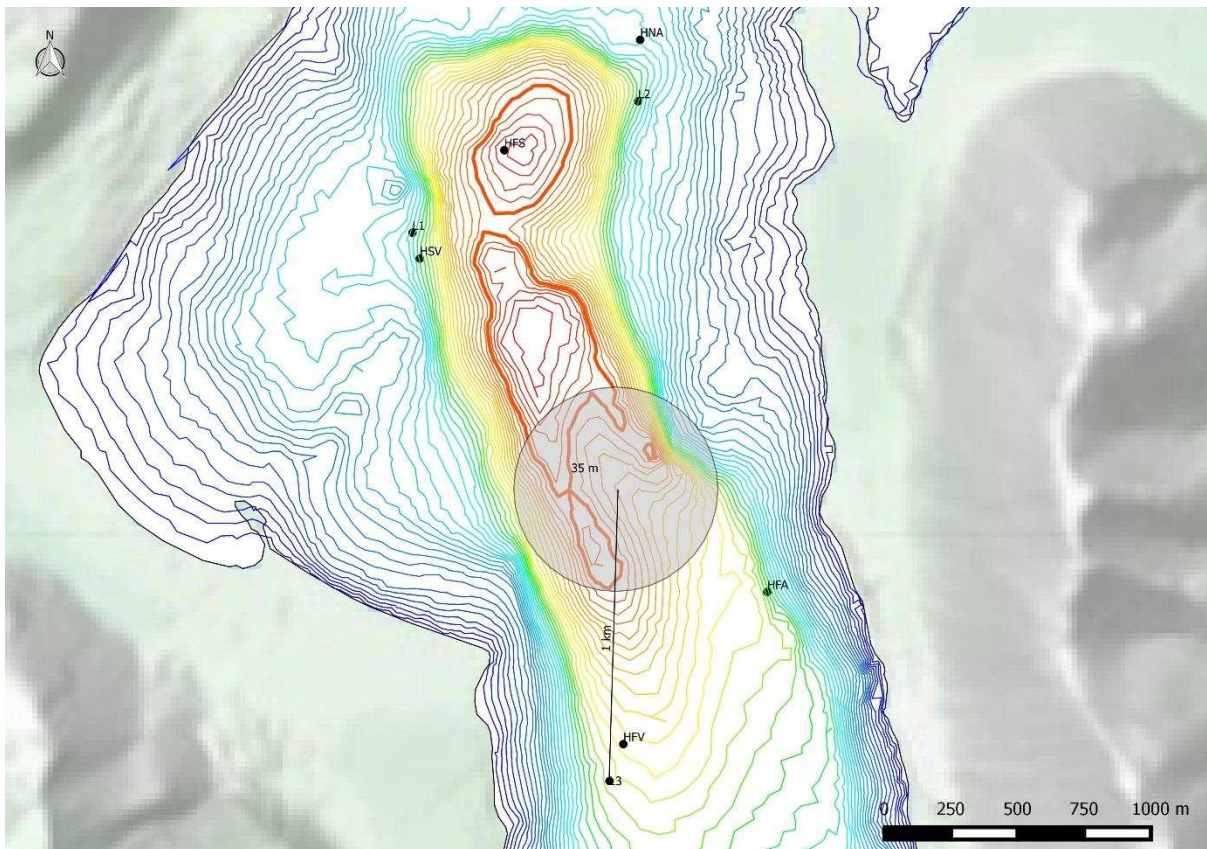
Mynd 9. Mælt dýpi MicroCAT mæla á L3.



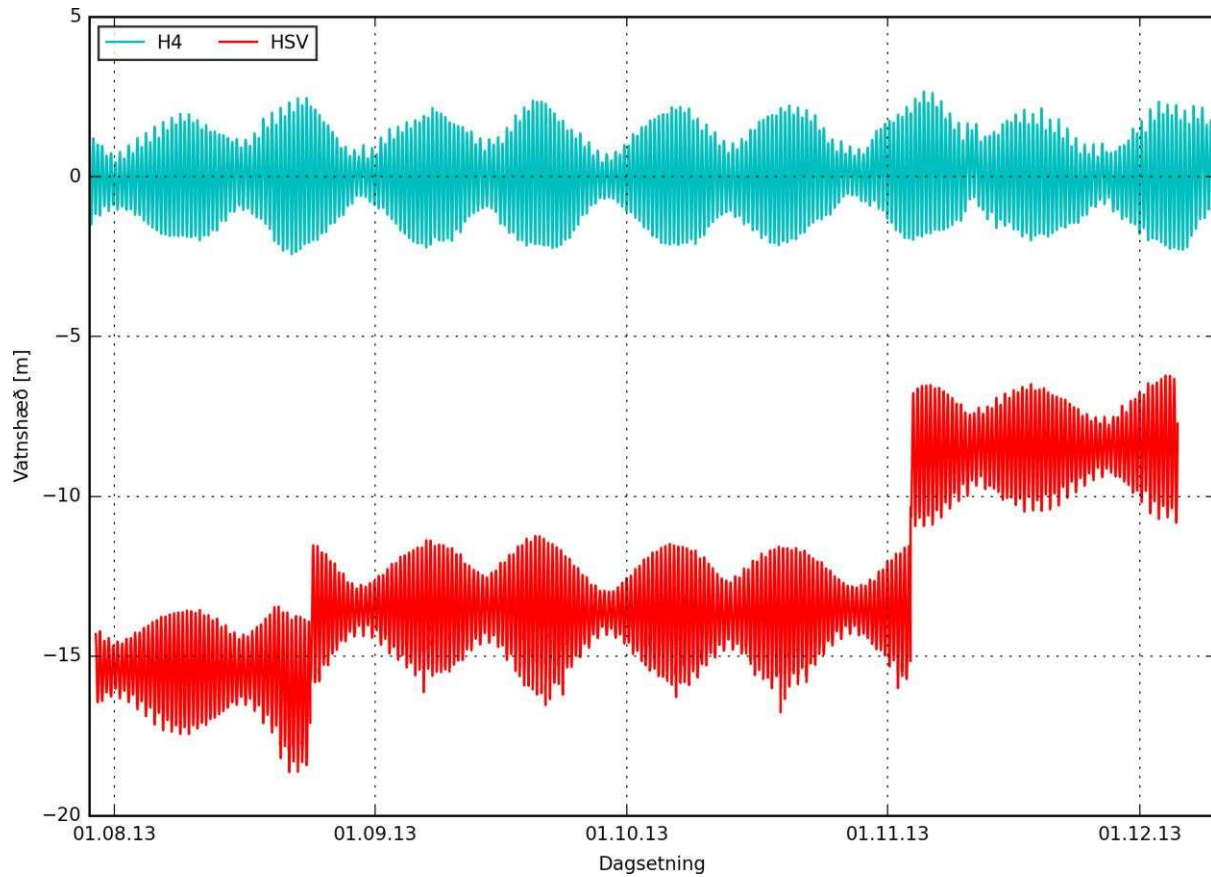
Mynd 10. Nærmynd af dýptarmælingum MicroCAT mæla á L3, 4. til 7. des. 2013.



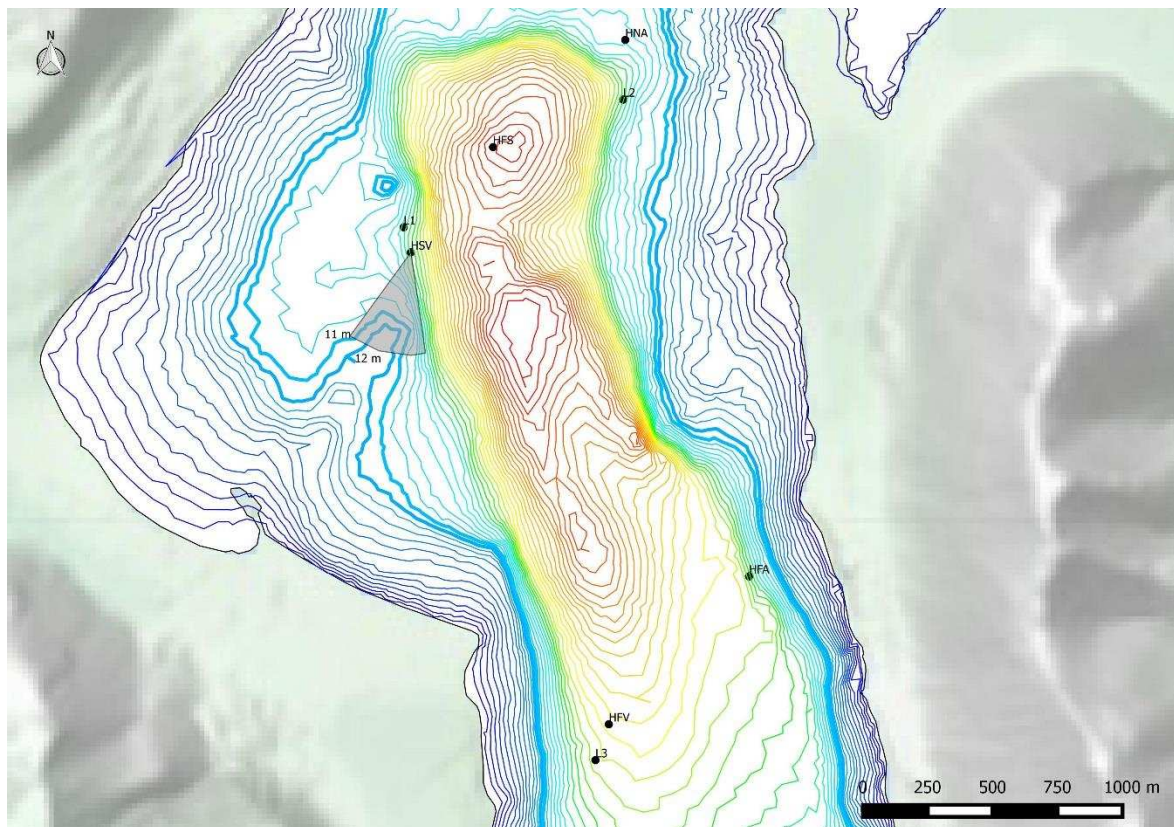
Mynd 11. Nærmynd af dýptarmælingum MicroCAT mæla á L3, 1. til 4. jan. 2014.



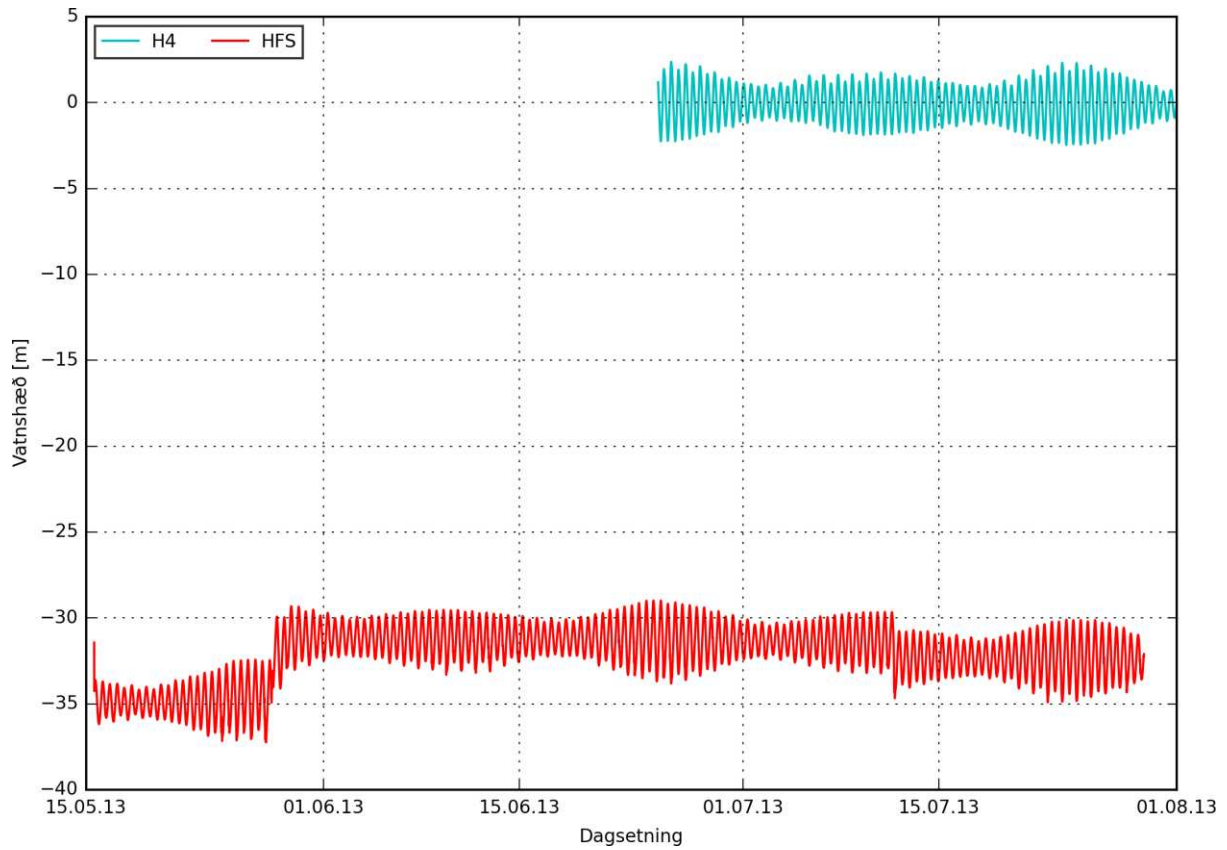
Mynd 12. Upphafleg staðsetning MicroCAT mælitækja og möguleg lokastaðsetning L3 eftir færslu.



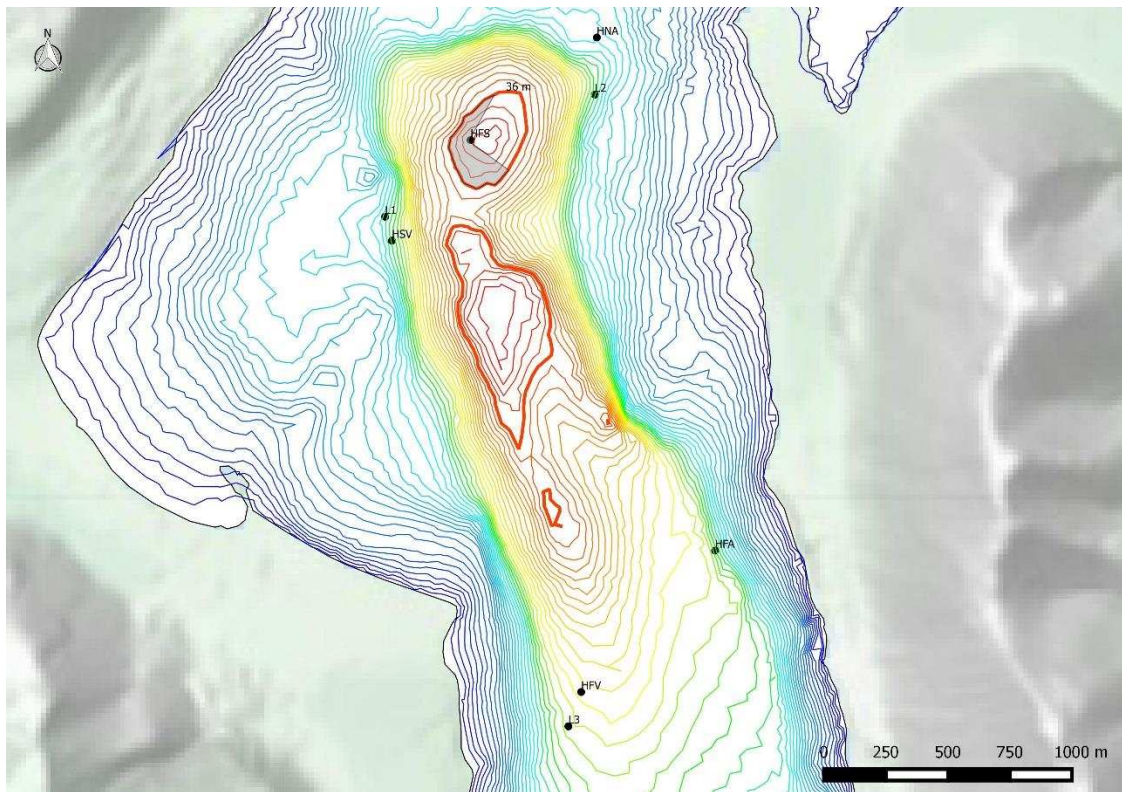
Mynd 13. Mælt dýpi MicroCAT mæla á HSV.



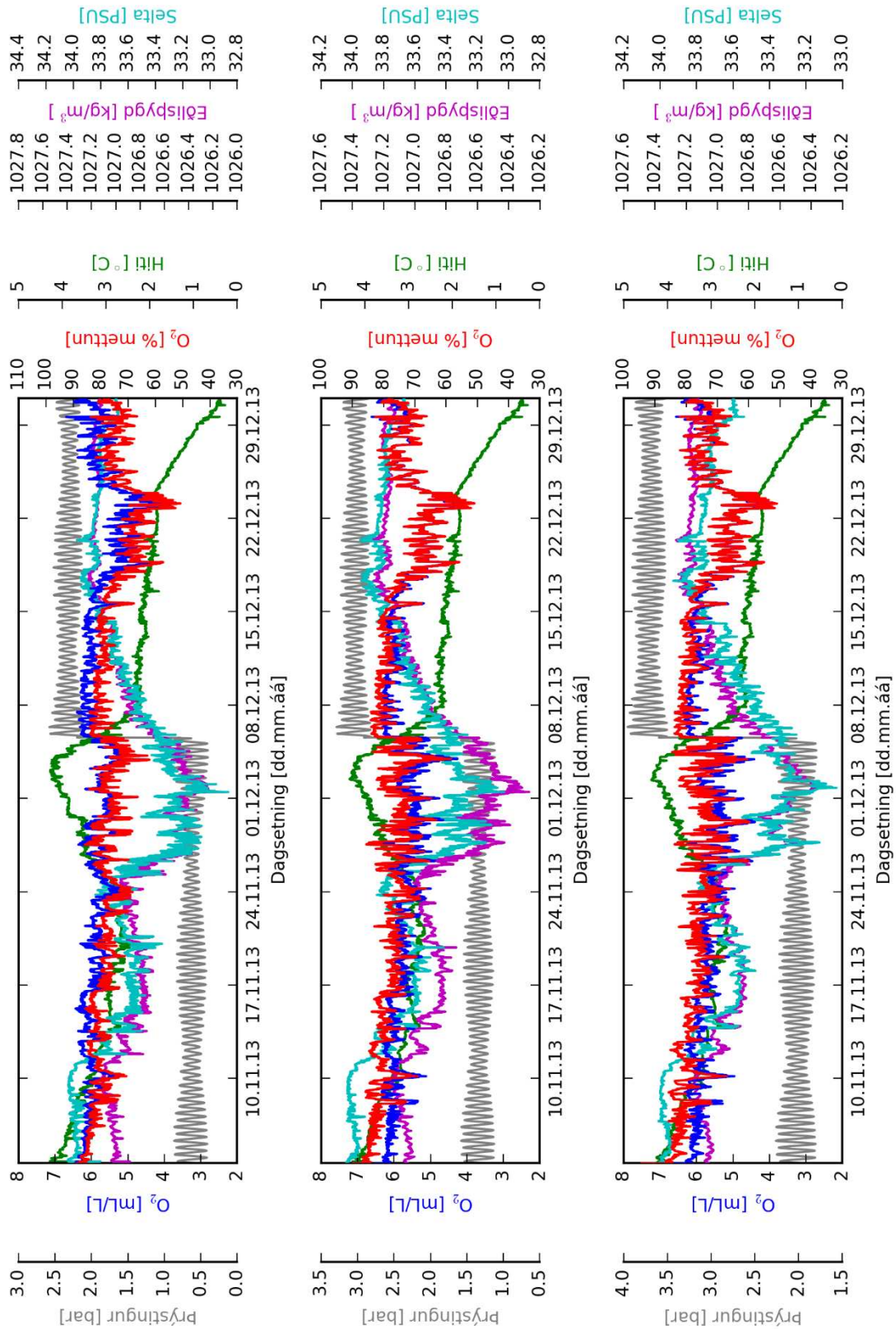
Mynd 14. Upphafleg staðsetning MicroCAT mælitækja og möguleg lokastaðsetning HSV.



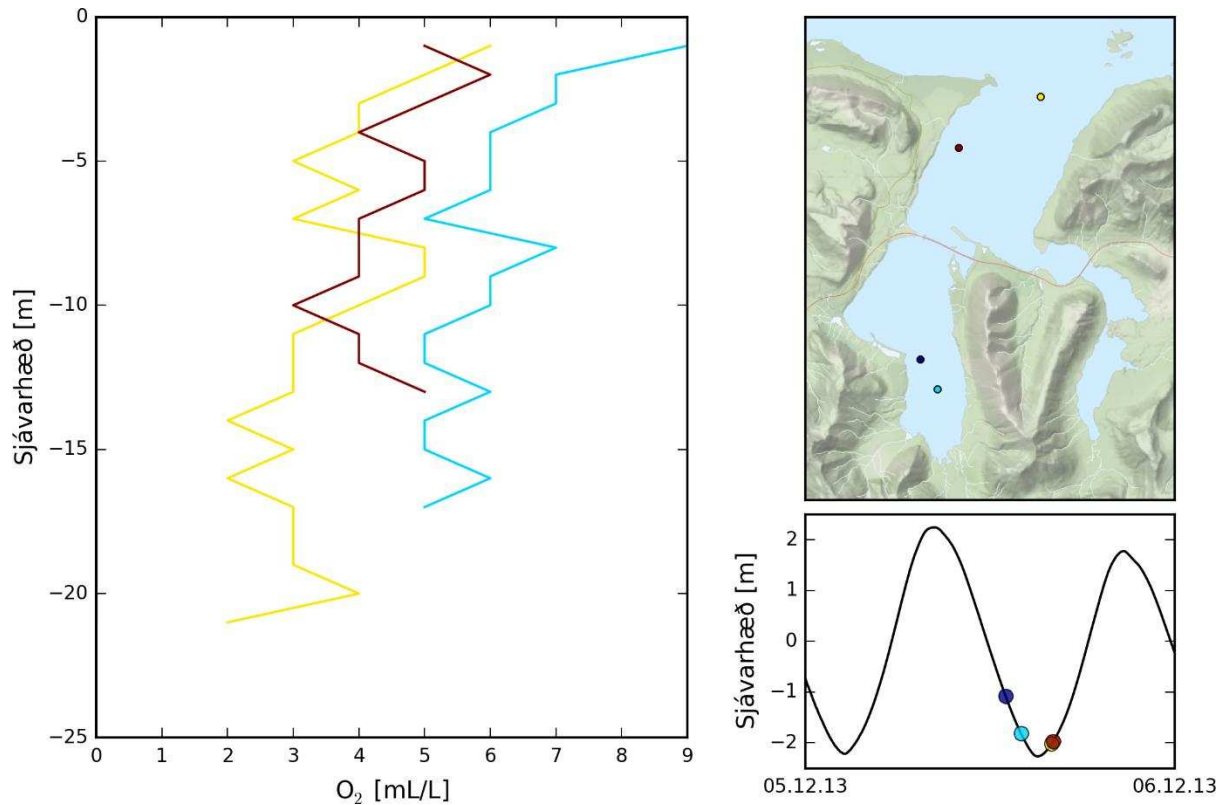
Mynd 15. Mælt dýpi MicroCAT mæla á HFS.



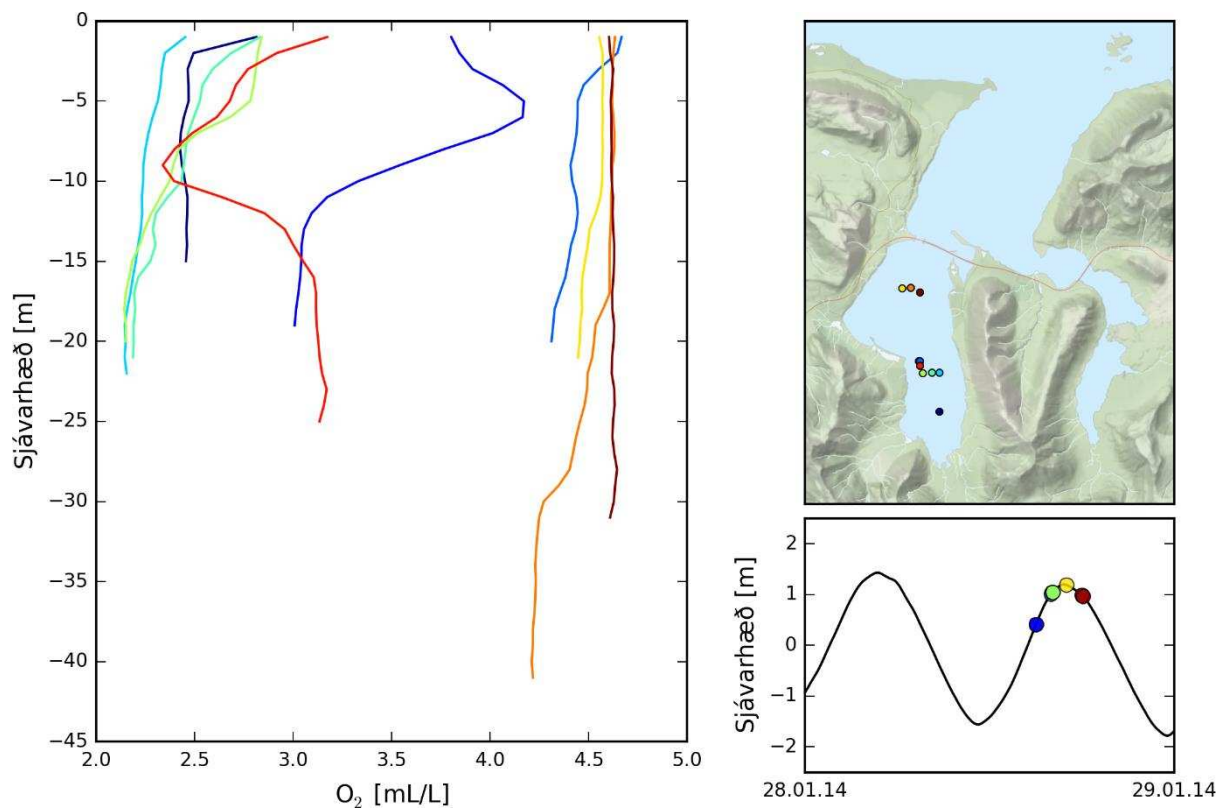
Mynd 16. Upphafleg staðsetning MicroCAT mælitækja og möguleg lokastaðsetning HFS.



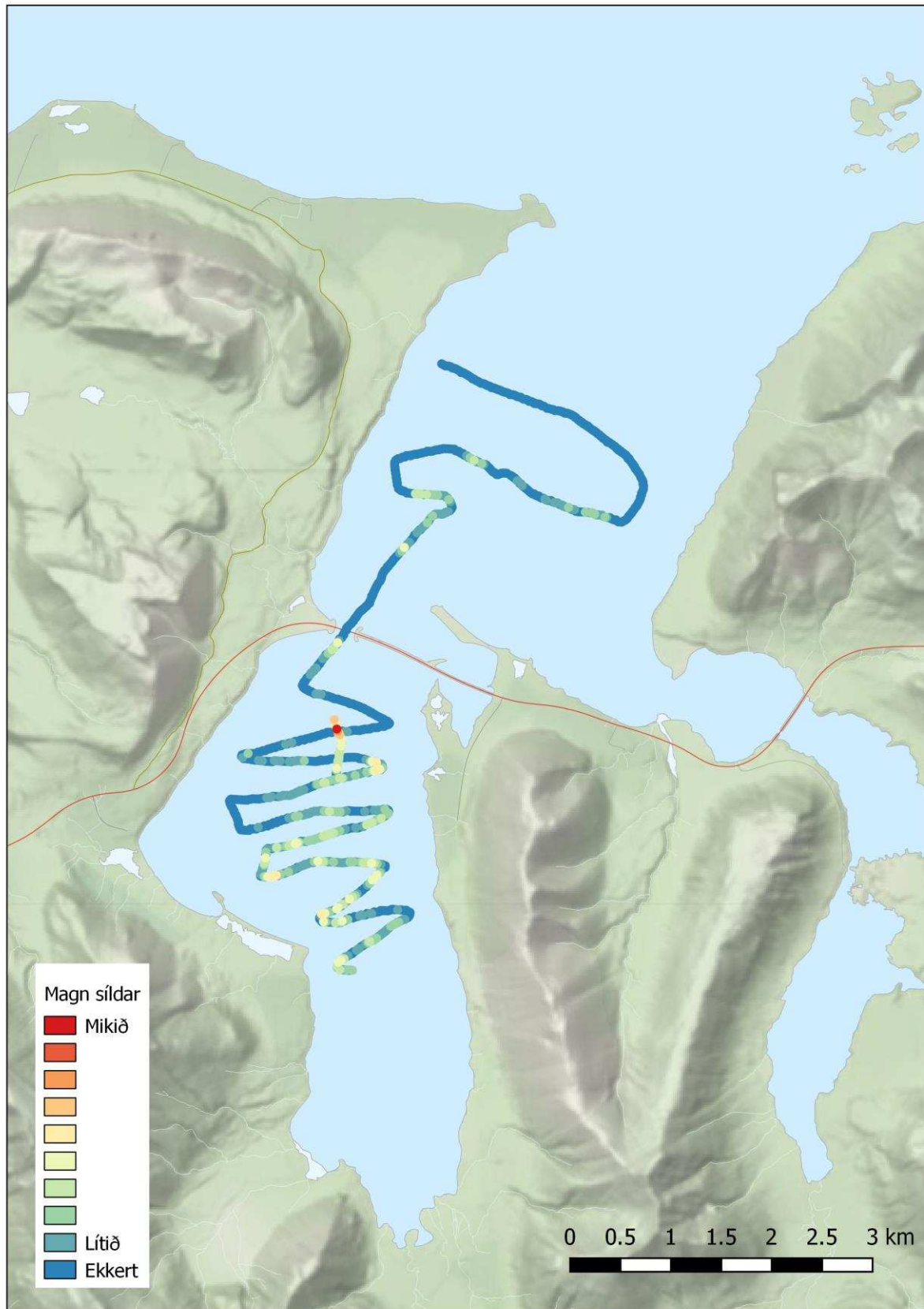
Mynd 17. Mælingar á L3e (efst), L3m (miðja) og L3n (neðst) frá 3.11.2013 – 31.12.2013.



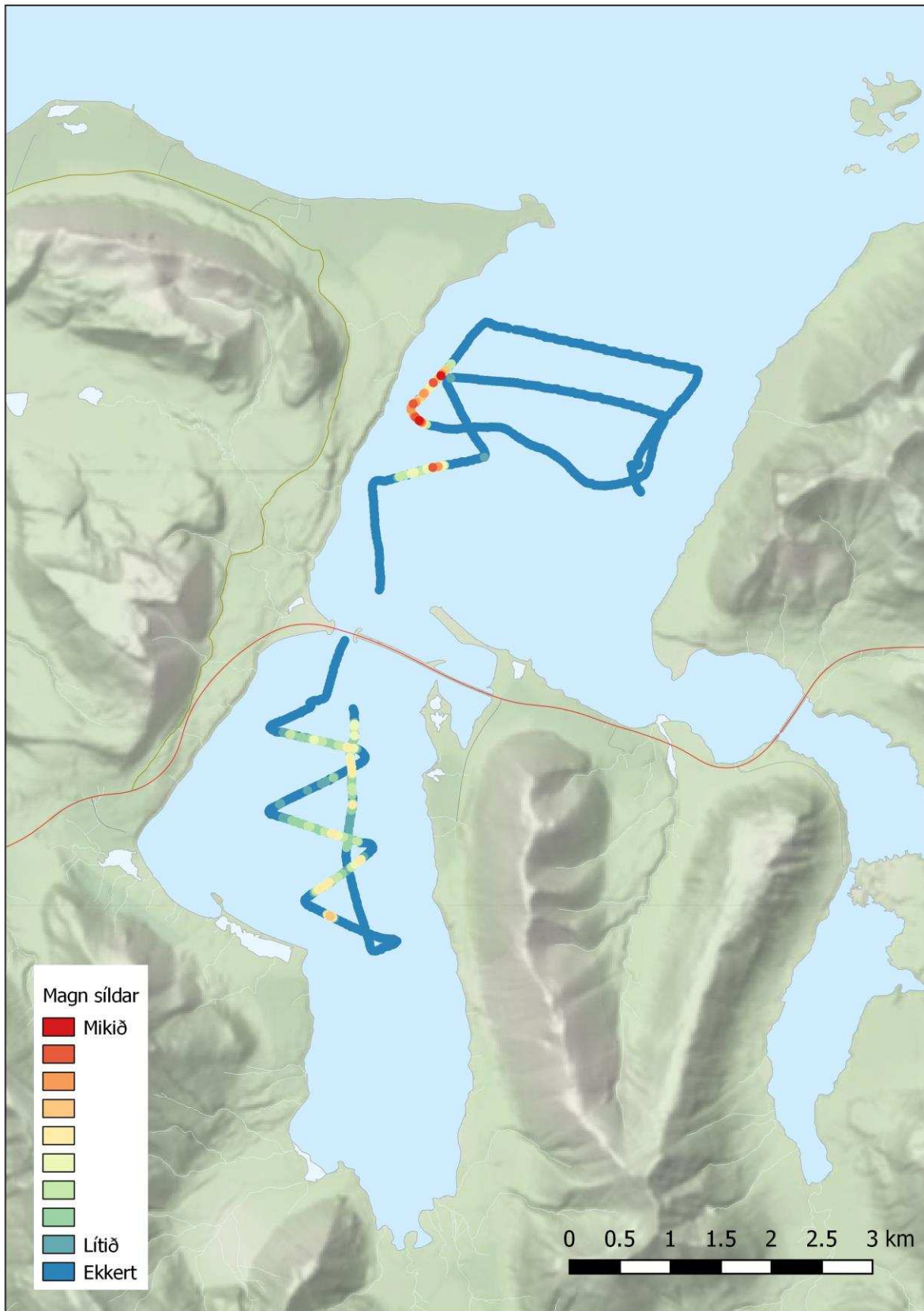
Mynd 18. Sondumælingar 5.12.2013. Mældur súrefnisstyrkur (vinstri), staðsetning mælistaða (efri hægrri) og sjávarstaða við mælingu (neðri hægrri). Súrefnismæling fór ekki fram á fyrsta staðnum.



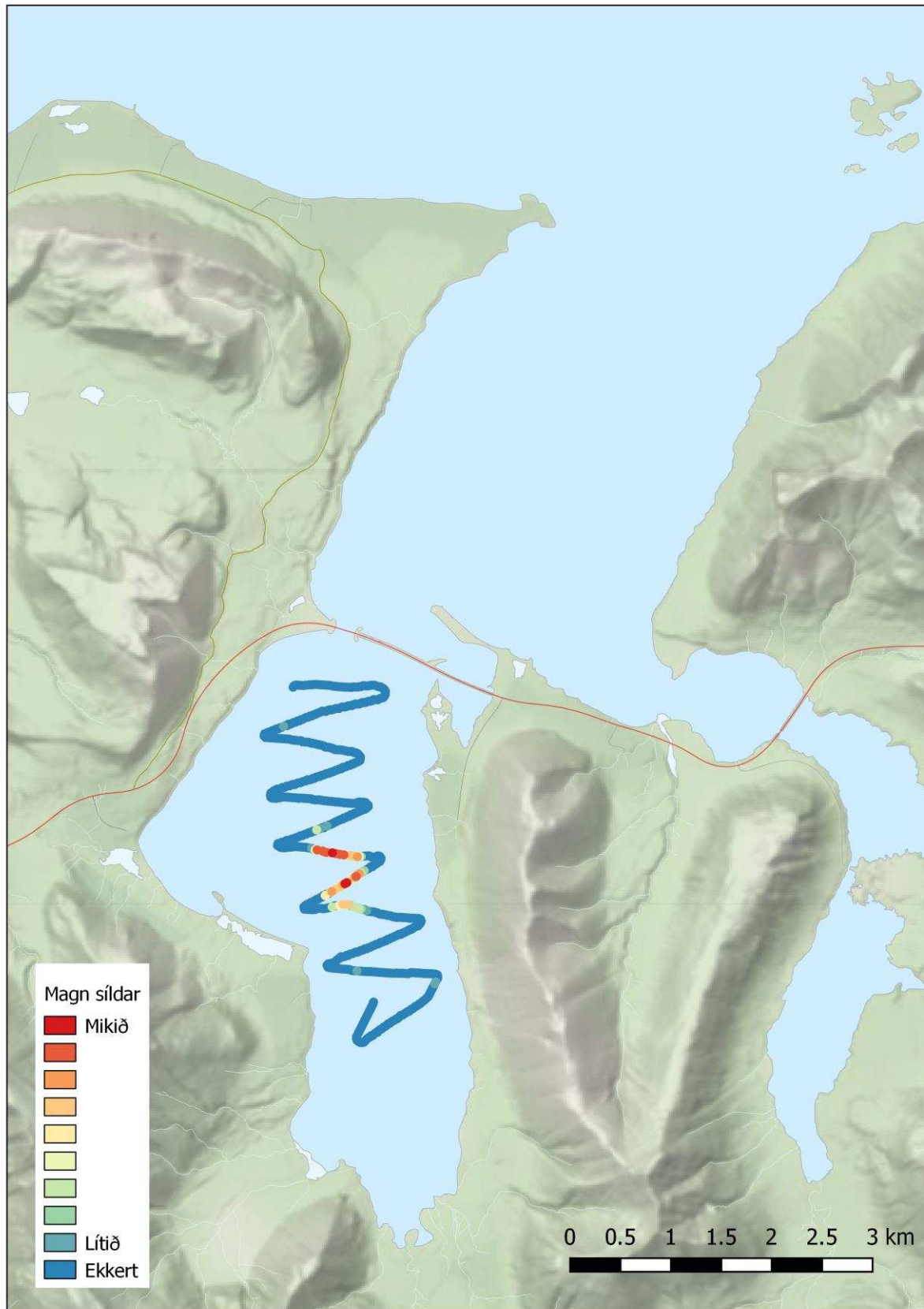
Mynd 19. Sondumælingar 28.01.2014. Mældur súrefnisstyrkur (vinstri), staðsetning mælistaða (efri hægrri) og sjávarstaða við mælingu (neðri hægrri).



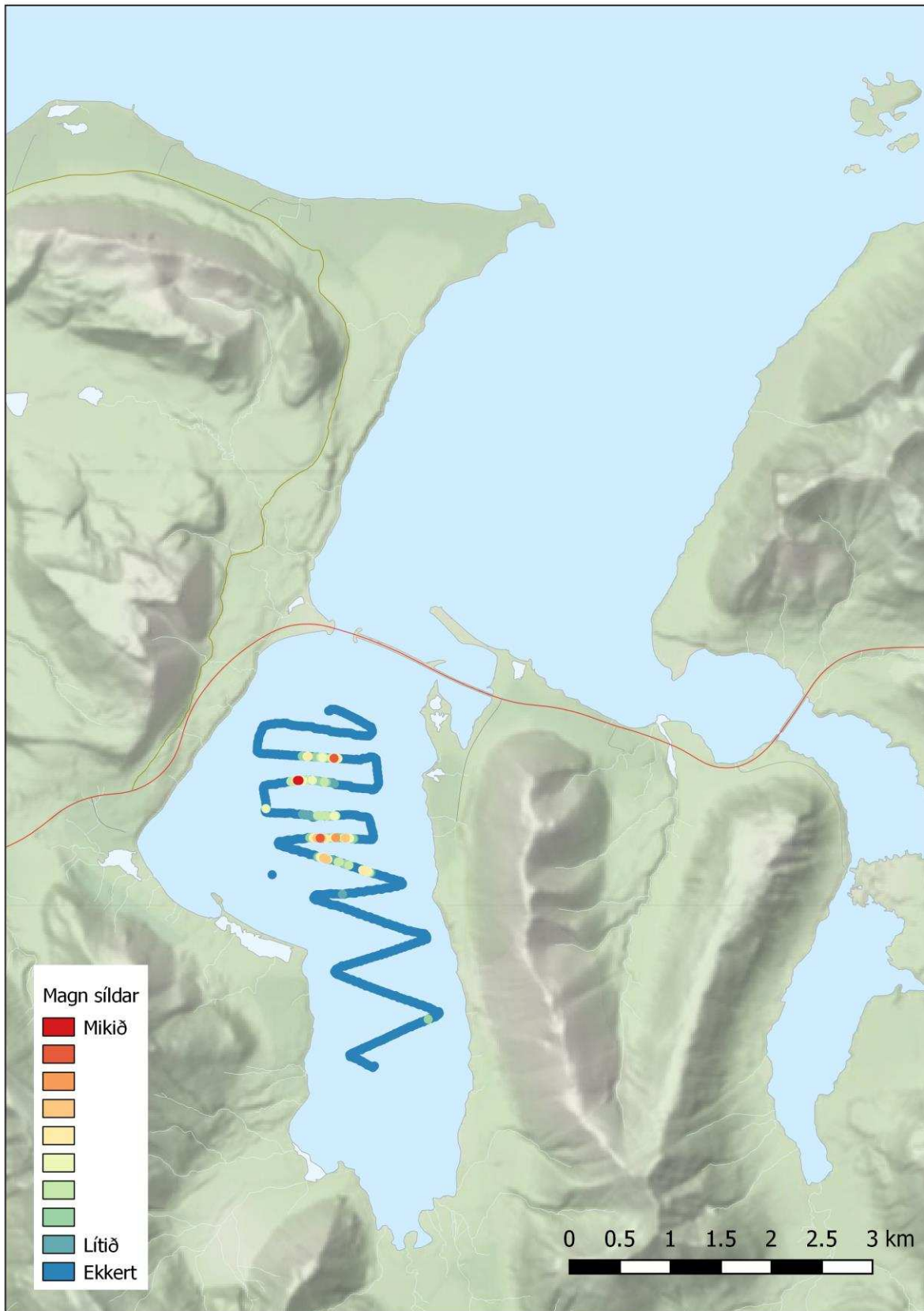
Mynd 20. Síldardreifing frá bergmálmælingu 12. desember 2012. Litakvarði sýnir hlutfallslegt magn síldar. Heildarmagn síldar var metið um 270 þús. tonn.



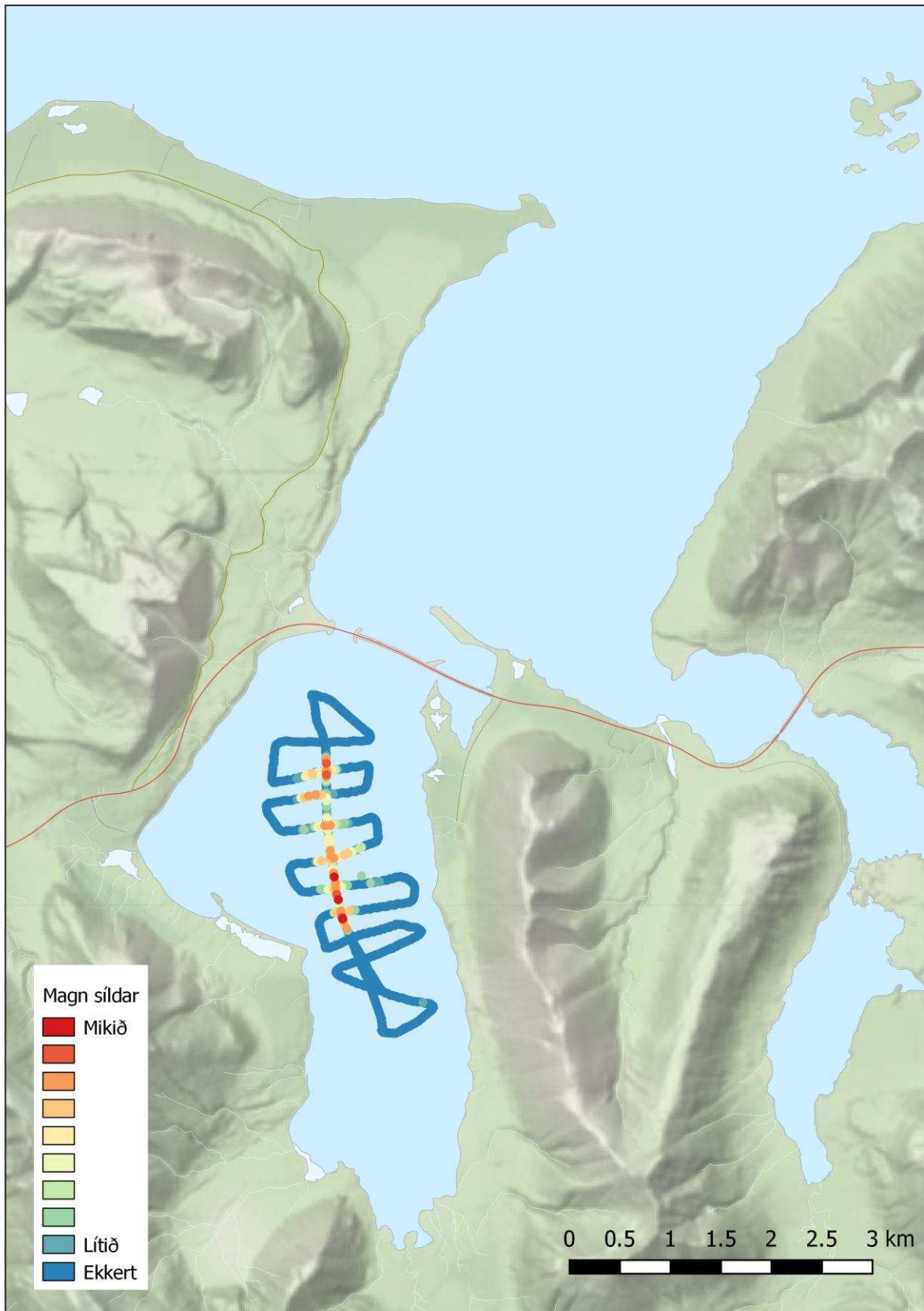
Mynd 21. Síldardreifing frá bergmálmælingu 12. mars 2013. Litakvarði sýnir hlutfallslegt magn síldar. Heildarmagn síldar var metið um 120 þús. tonn.



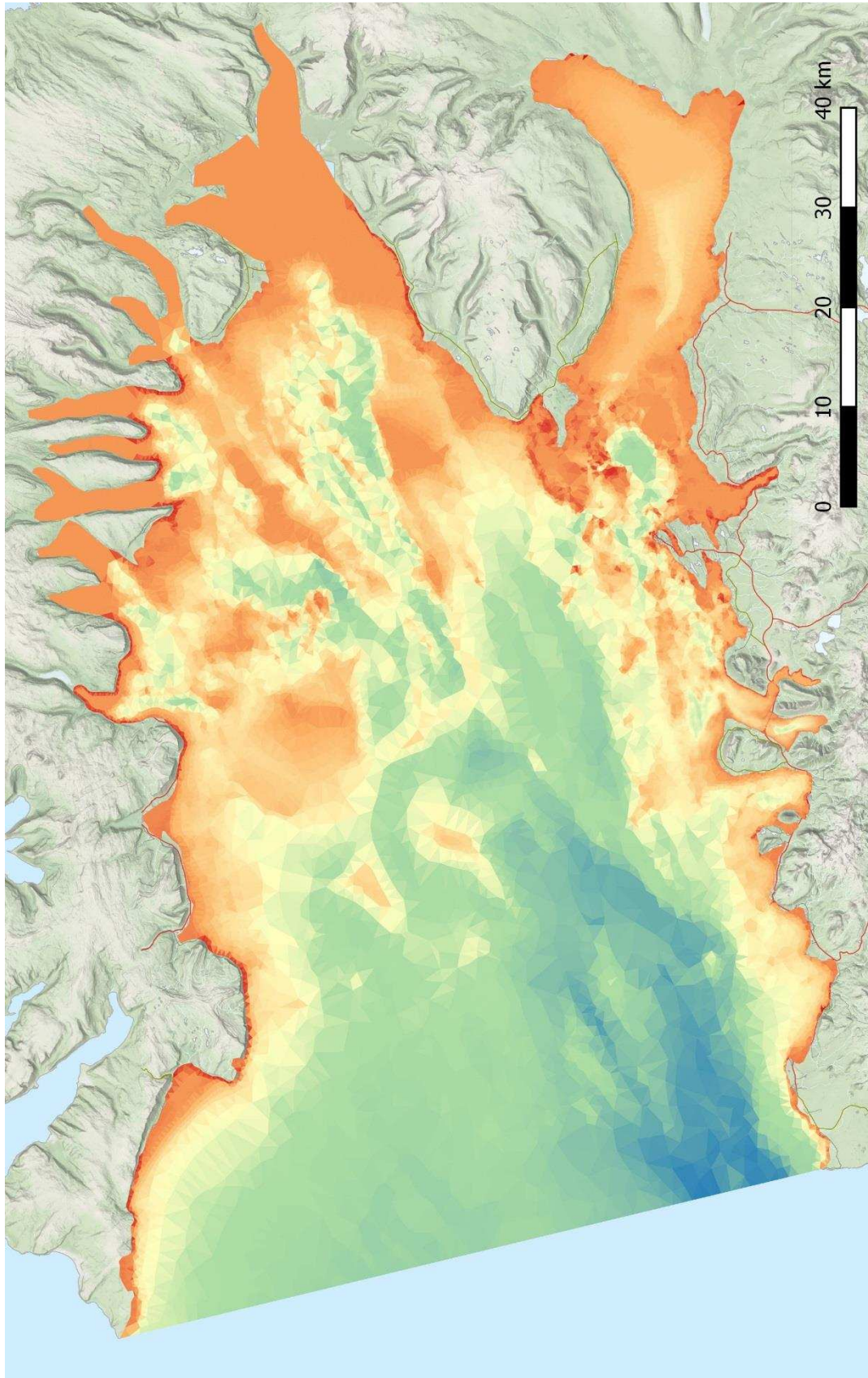
Mynd 22. Síldardreifing frá bergmálmælingu 28. nóvember 2013. Litakvarði sýnir hlutfallslegt magn síldar. Heildarmagn síldar var metið um 50 þús. tonn.



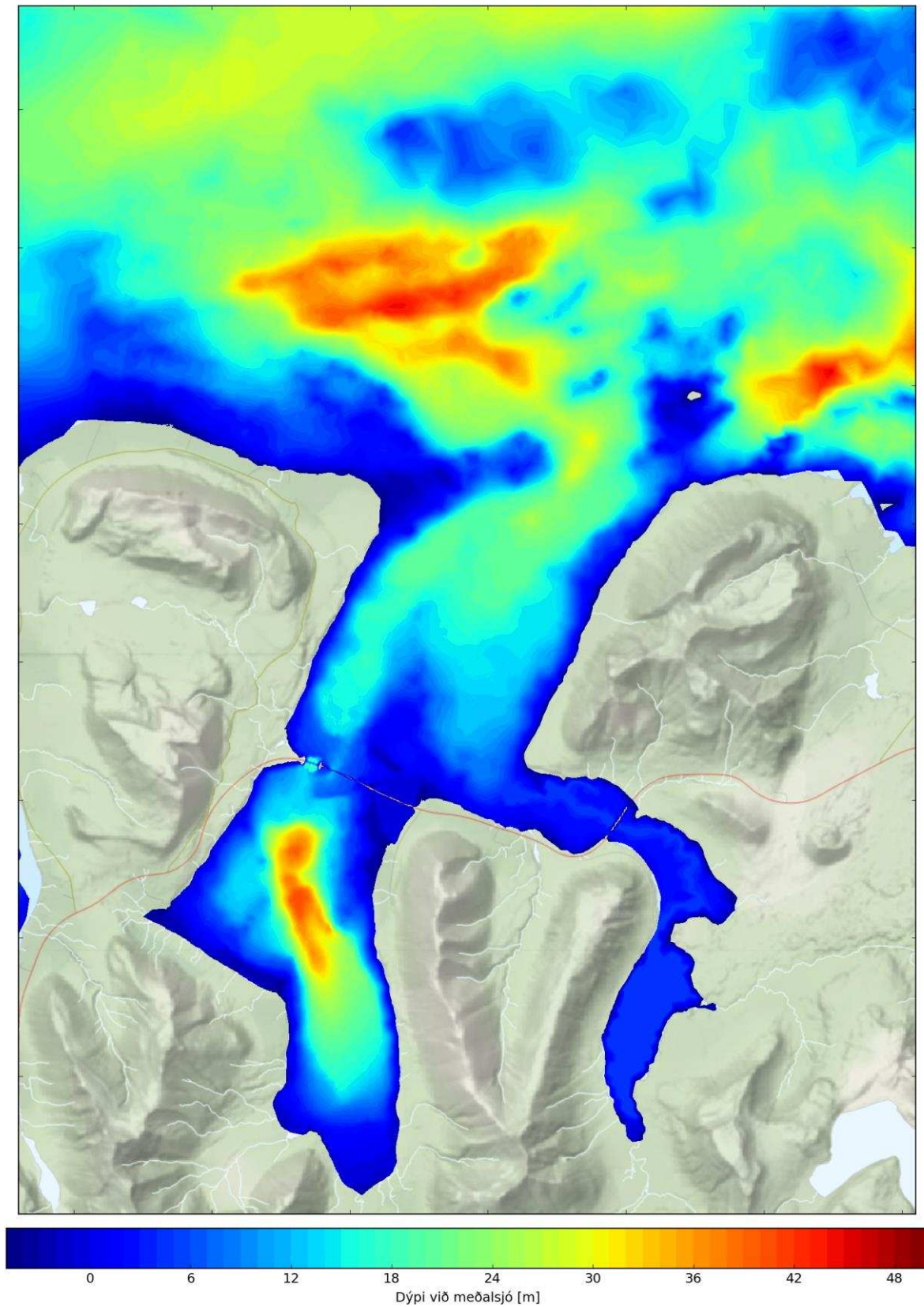
Mynd 23. Síldardreifing frá bergmálmælingu 11. janúar 2014. Litakvarði sýnir hlutfallslegt magn síldar. Heildarmagn síldar var metið um 60 þús. tonn.



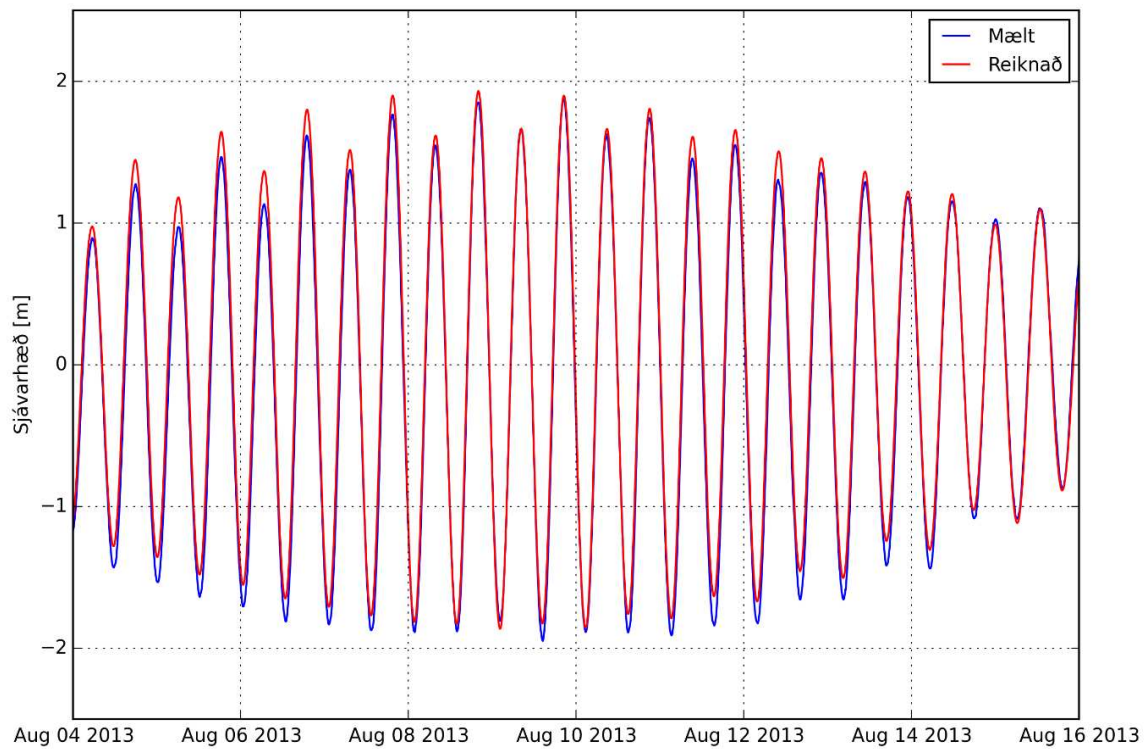
Mynd 24. Síldardreifing frá bergmálmælingu 12. mars 2014. Litakvarði sýnir hlutfallslegt magn síldar. Heildarmagn síldar var metið um 85 þús. tonn.



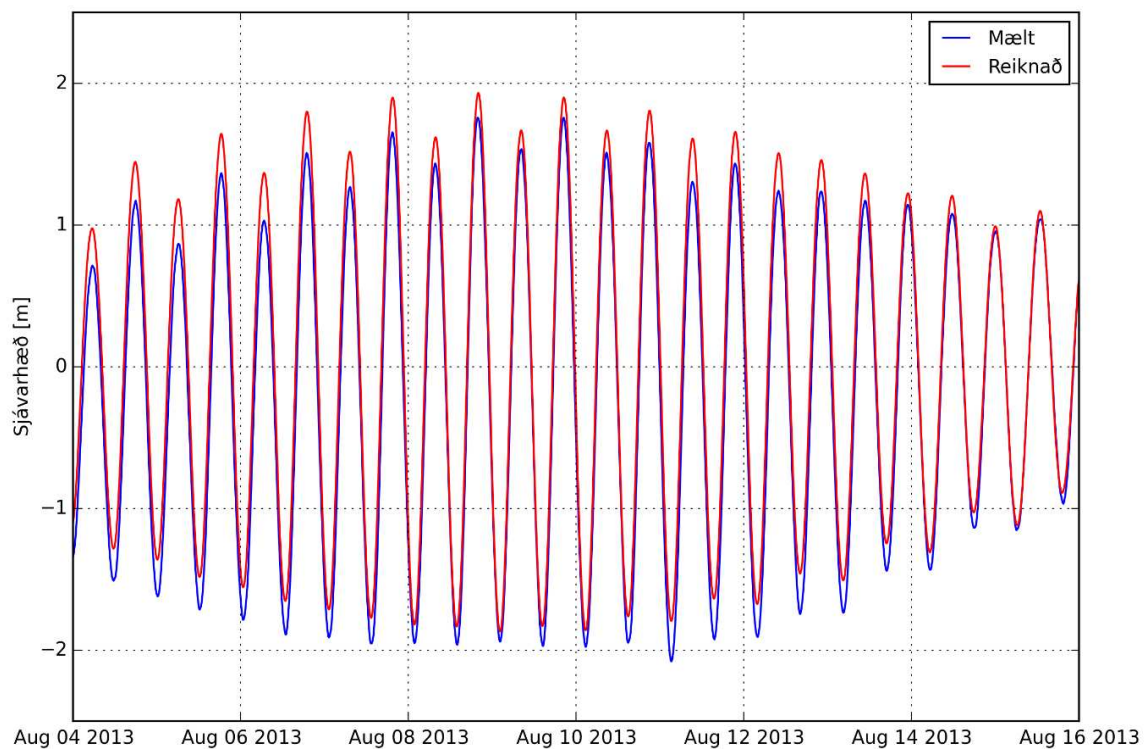
Mynd 25. Dýptargrunnur straumlíkans. Litaskalinn nær frá 20 m y.s. (rautt) að 295 m dýpi (blátt).



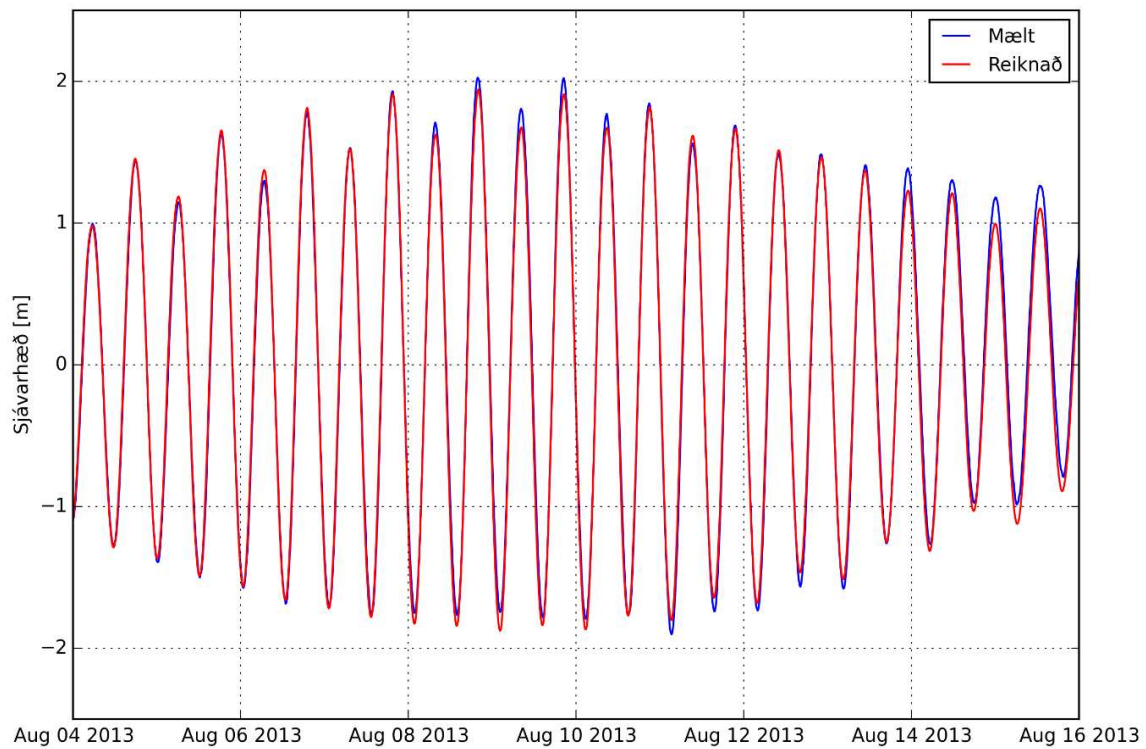
Mynd 26. Dýpi í Kolgrafafirði. Á myndinni sjást m.a. þrengingar við mynni Kolgrafafjarðar.



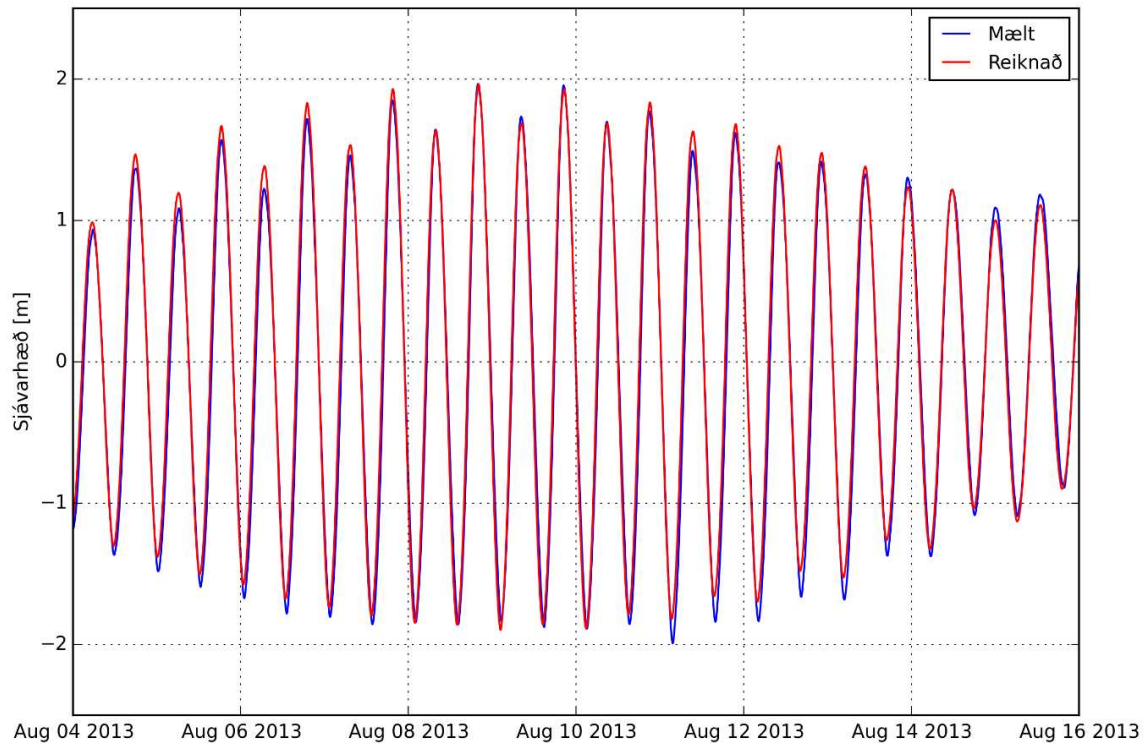
Mynd 27. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar í mynni Kolgrafafjarðar vestan til (H1).



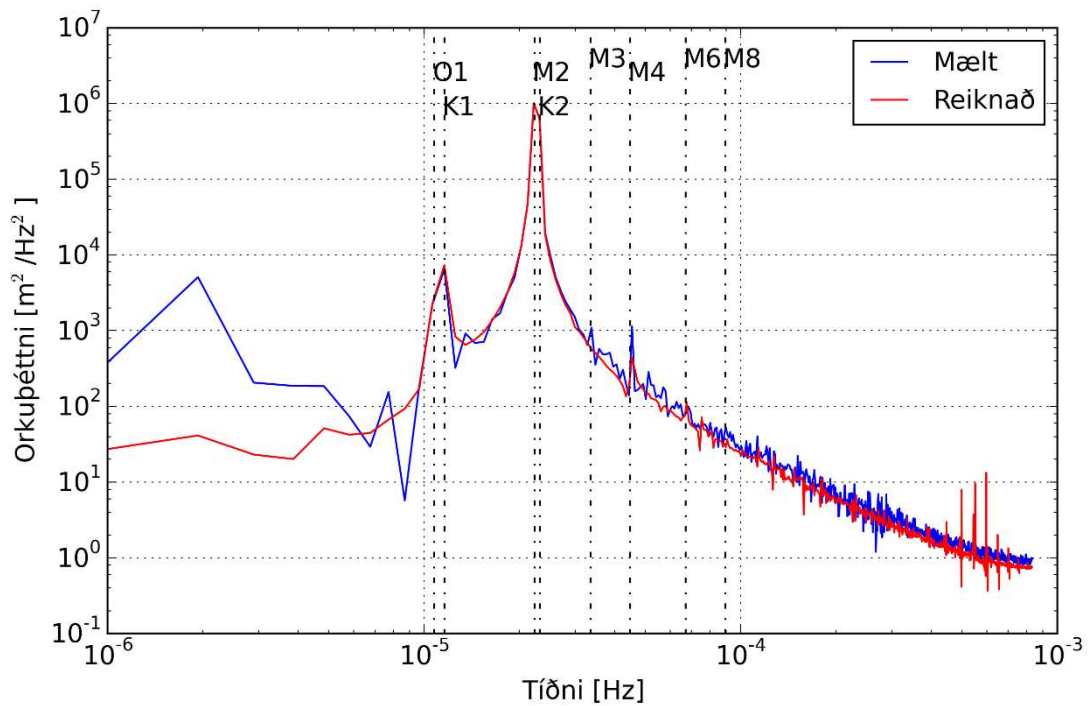
Mynd 28. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar í mynni Kolgrafafjarðar austan til (H2).



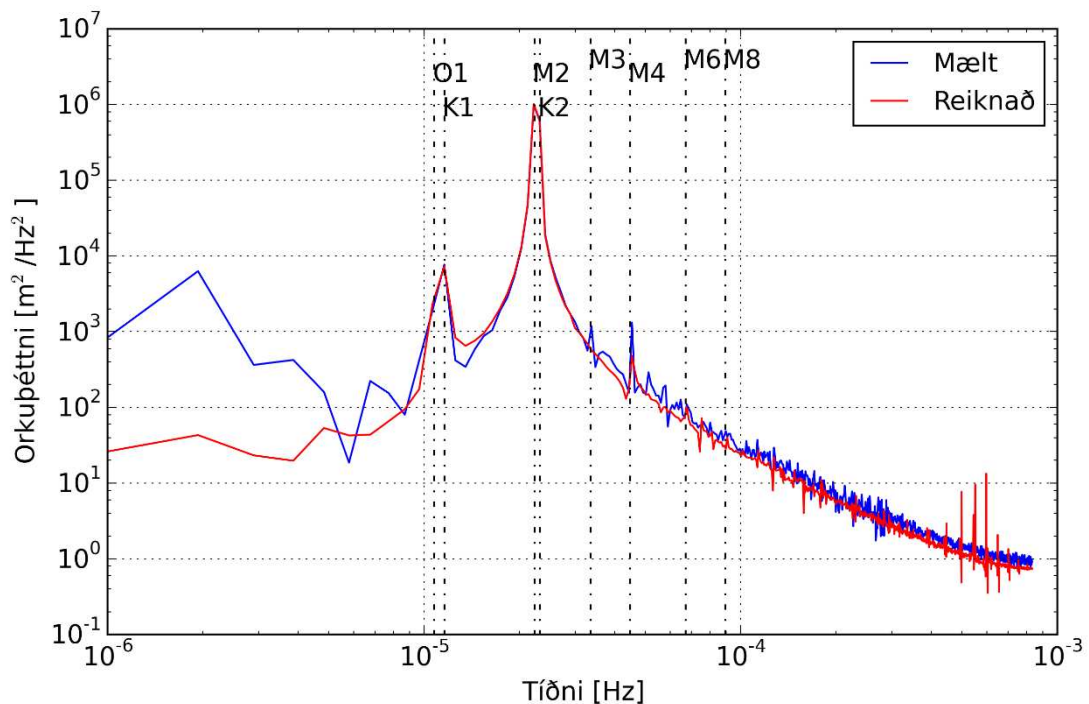
Mynd 29. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar utan vegfyllingar í Kolgrafafirði við vestur strönd (H3).



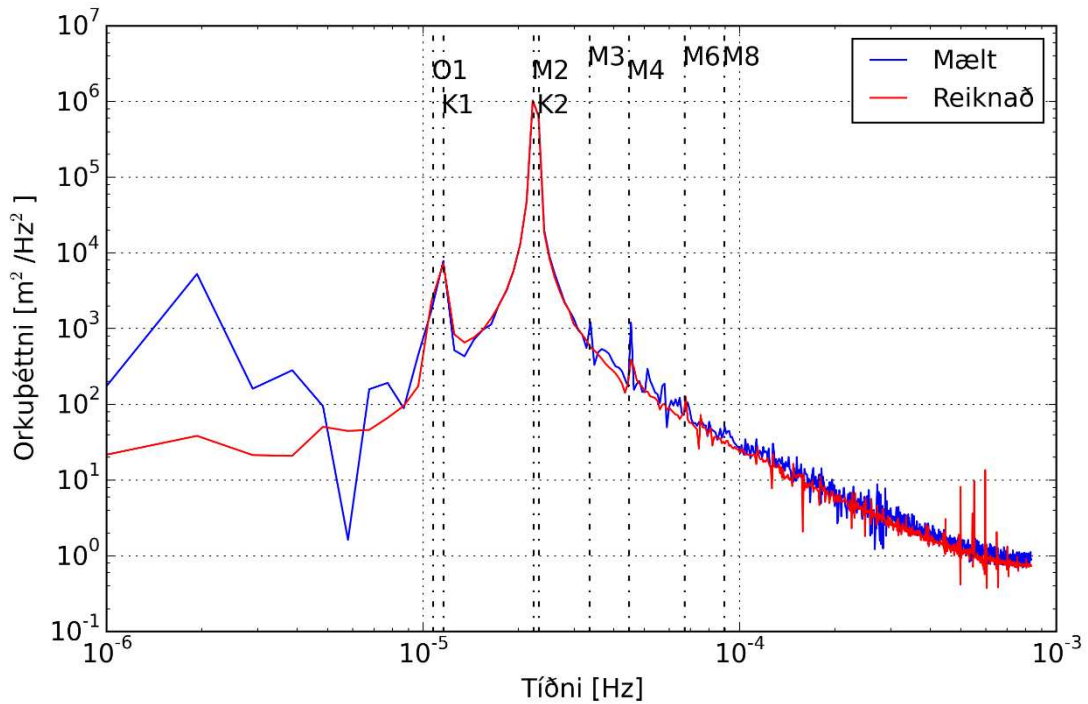
Mynd 30. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar innan vegfyllingar í Kolgrafafirði við Eiðsstapa (H4).



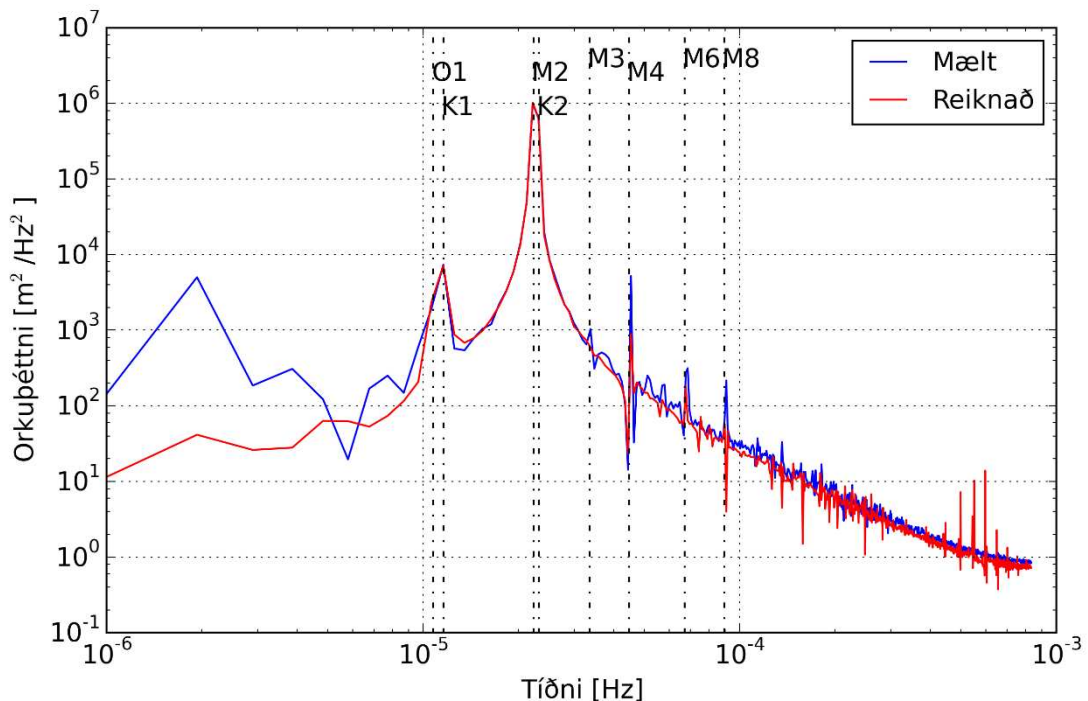
Mynd 31. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar í tíðnirófi fyrir 12 daga tímaröð við mynni Kolgrafafjarðar vestan til (H1). Tíðnir helstu sjávarfallabátta hafa verið merktar inn á myndina.



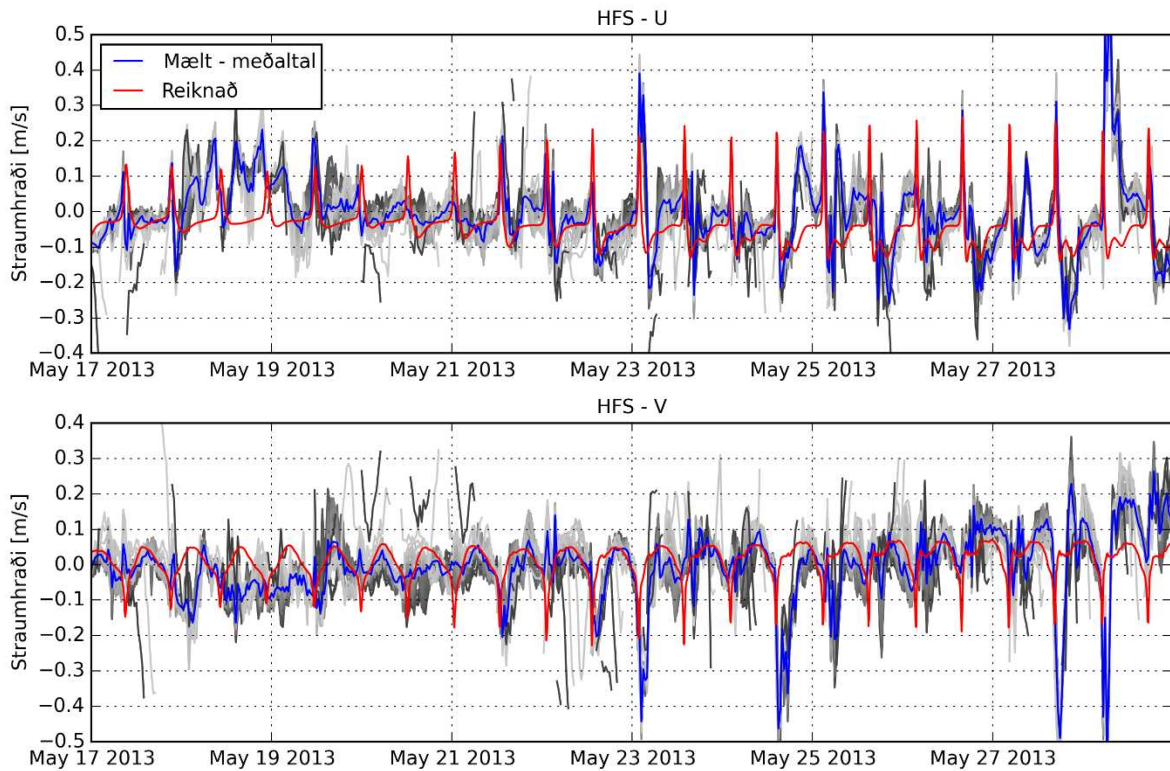
Mynd 32. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar í tíðnirófi fyrir 12 daga tímaröð við mynni Kolgrafafjarðar austan til (H2). Tíðnir helstu sjávarfallabátta hafa verið merktar inn á myndina.



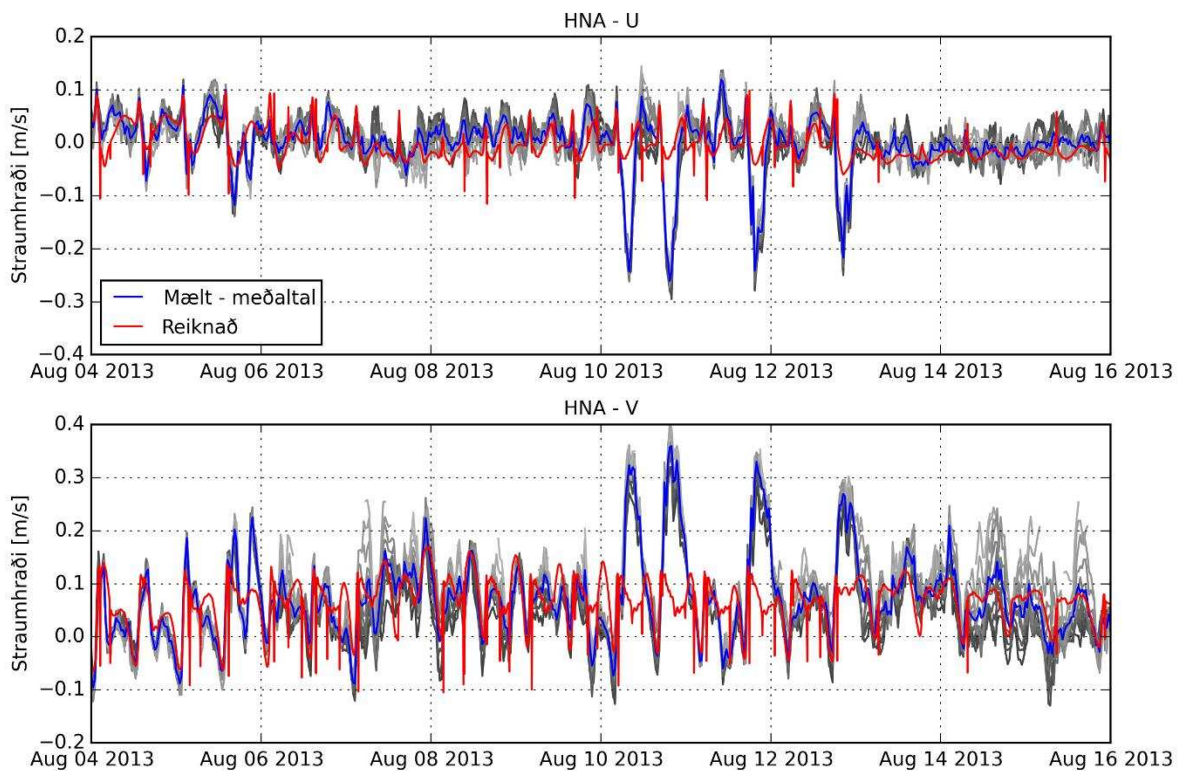
Mynd 33. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar í tíðnirófi fyrir 12 daga tímaröð utan vegfyllingar í Kolgrafafirði við vestur strönd (H3). Tíðnir helstu sjávarfallapátta hafa verið merktar inn á myndina.



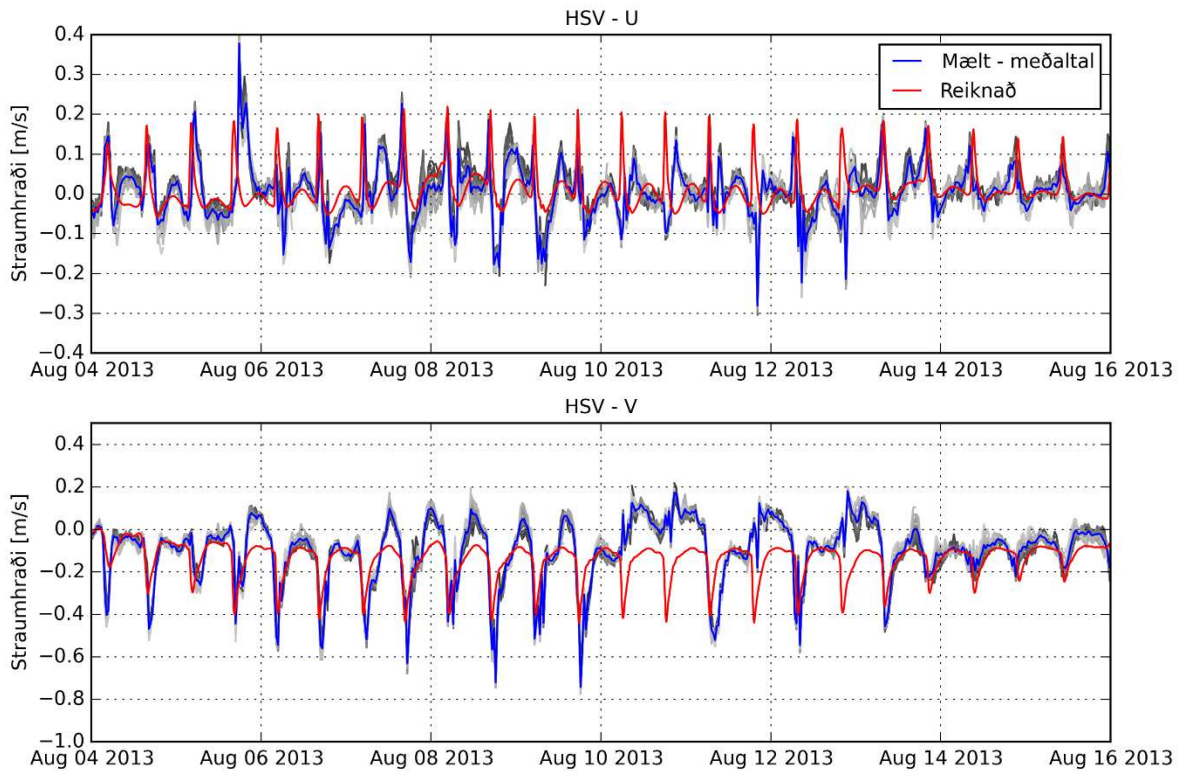
Mynd 34. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar í tíðnirófi fyrir 12 daga tímaröð innan vegfyllingar í Kolgrafafirði við Eiðisstapa (H4). Tíðnir helstu sjávarfallapátta hafa verið merktar inn á myndina.



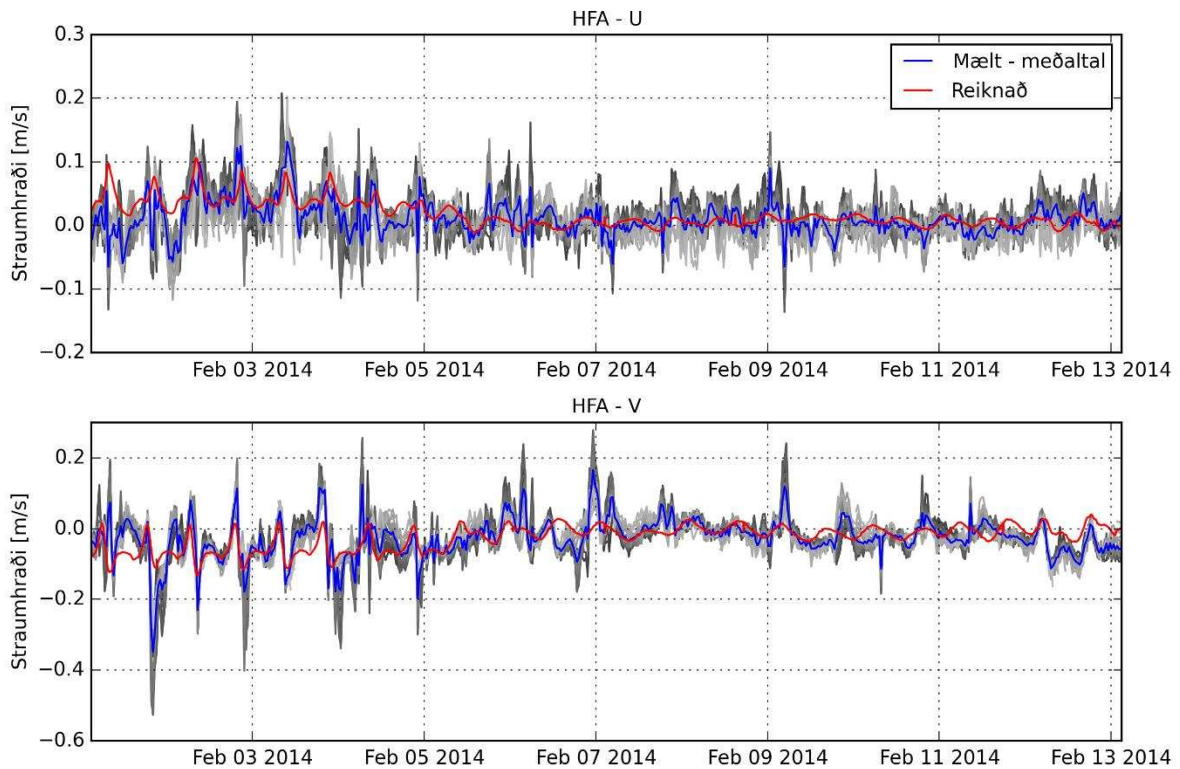
Mynd 35. Samanburður reiknaðra og mældra straumhraðapátta fyrir HFS. Straumhraði mældur á hverju dýptarbili fyrir sig er sýndur í gráskala litum í bakgrunni myndanna.



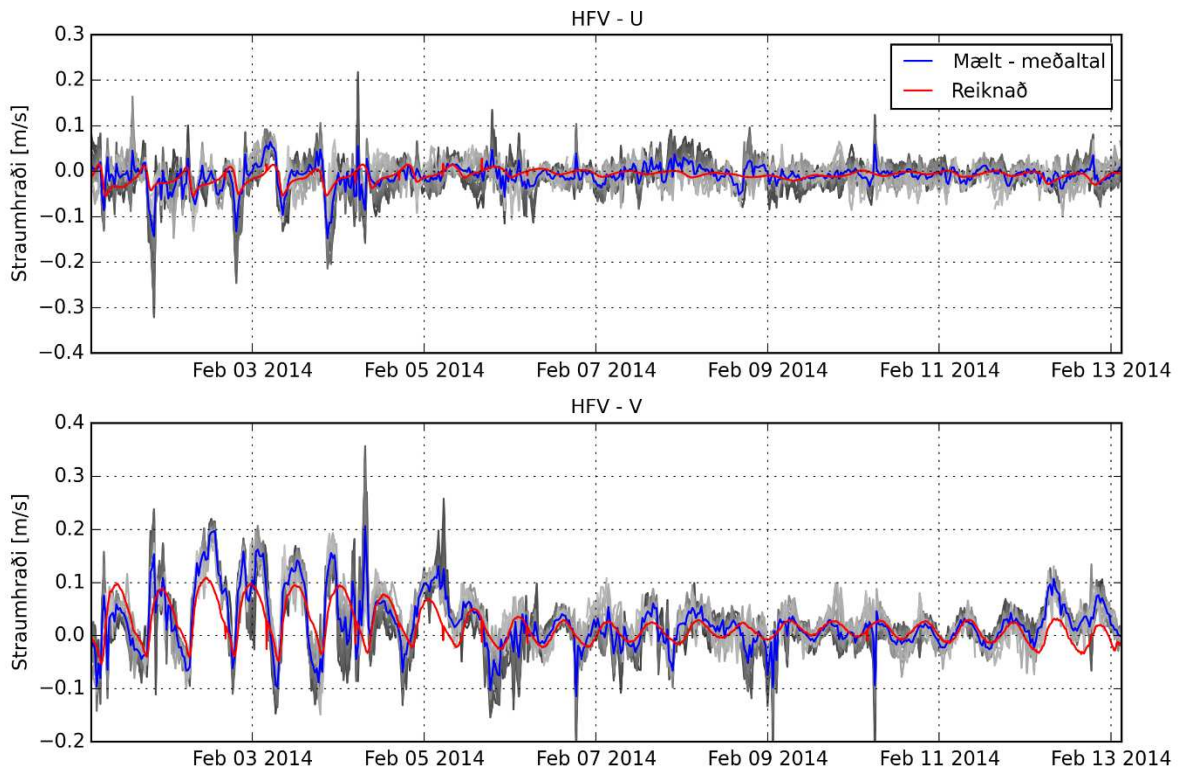
Mynd 36. Samanburður reiknaðra og mældra straumhraðapátta fyrir HNA. Straumhraði mældur á hverju dýptarbili fyrir sig er sýndur í gráskala litum í bakgrunni myndanna.



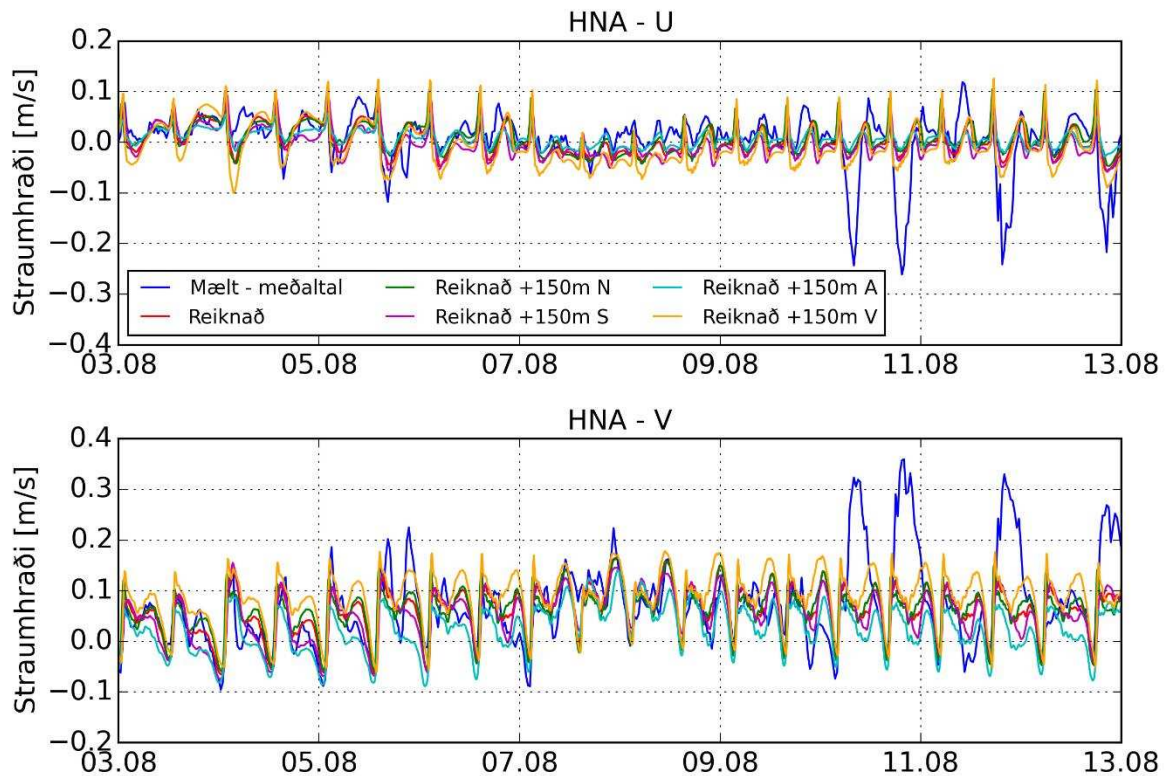
Mynd 37. Samanburður reiknaðra og mældra straumhraðapátta fyrir HSV. Straumhraði mældur á hverju dýptarbili fyrir sig er sýndur í gráskala litum í bakgrunni myndanna.



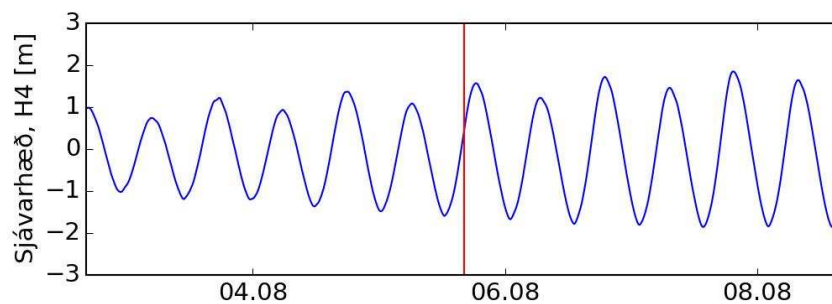
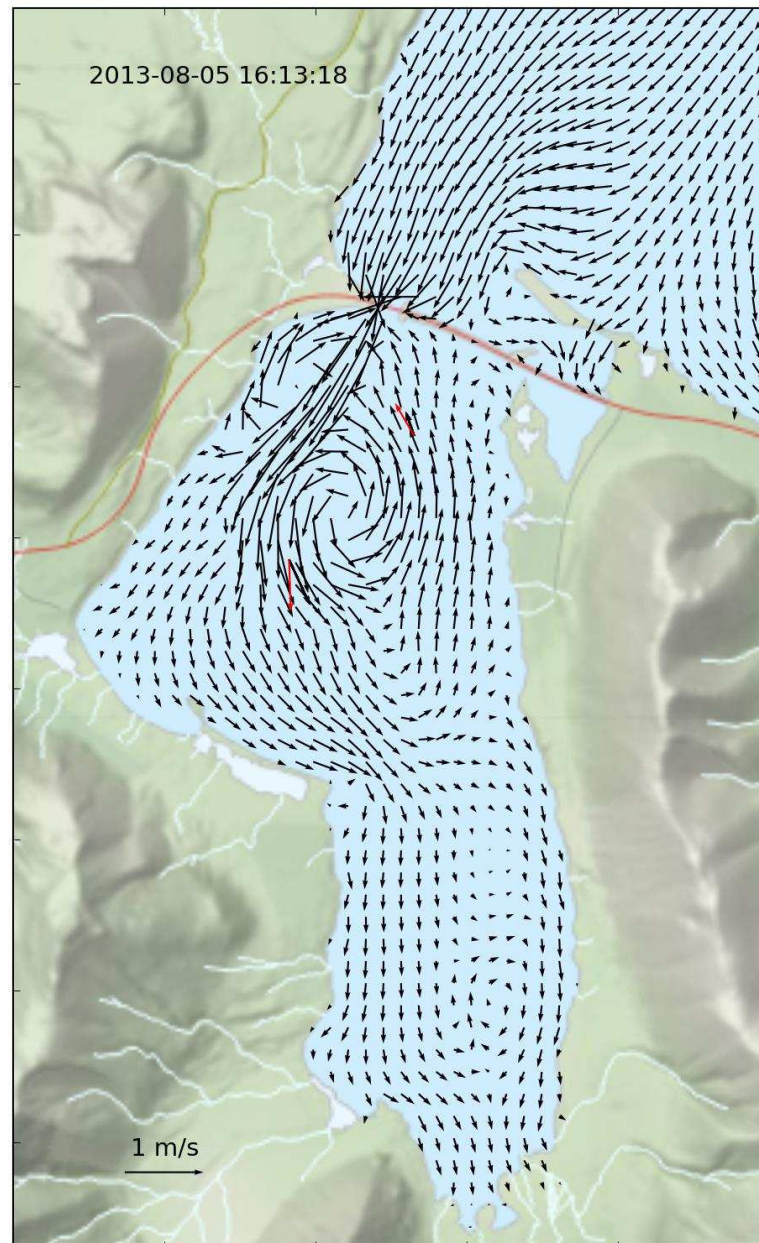
Mynd 38. Samanburður reiknaðra og mældra straumhraðapátta fyrir HFA. Straumhraði mældur á hverju dýptarbili fyrir sig er sýndur í gráskala litum í bakgrunni myndanna.



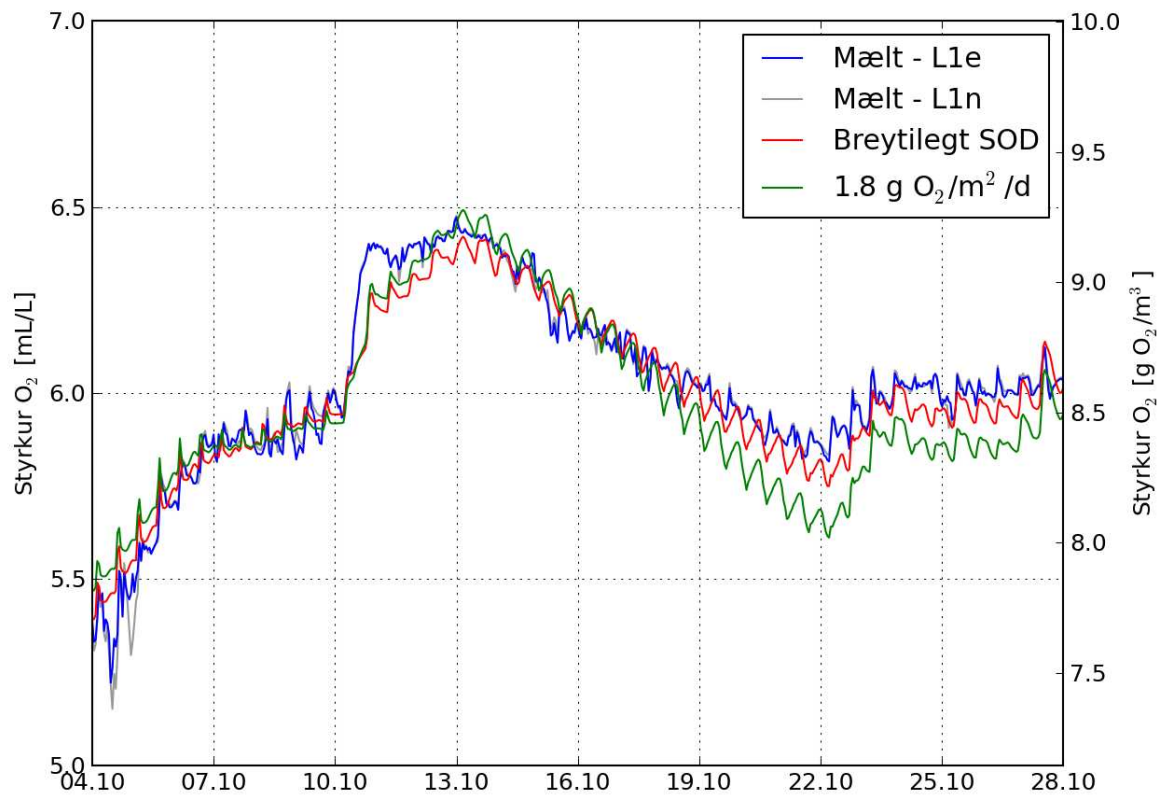
Mynd 39. Samanburður reiknaðra og mældra straumhraðapátta fyrir HFV. Straumhraði mældur á hverju dýptarbili fyrir sig er sýndur í gráskala litum í bakgrunni myndanna.



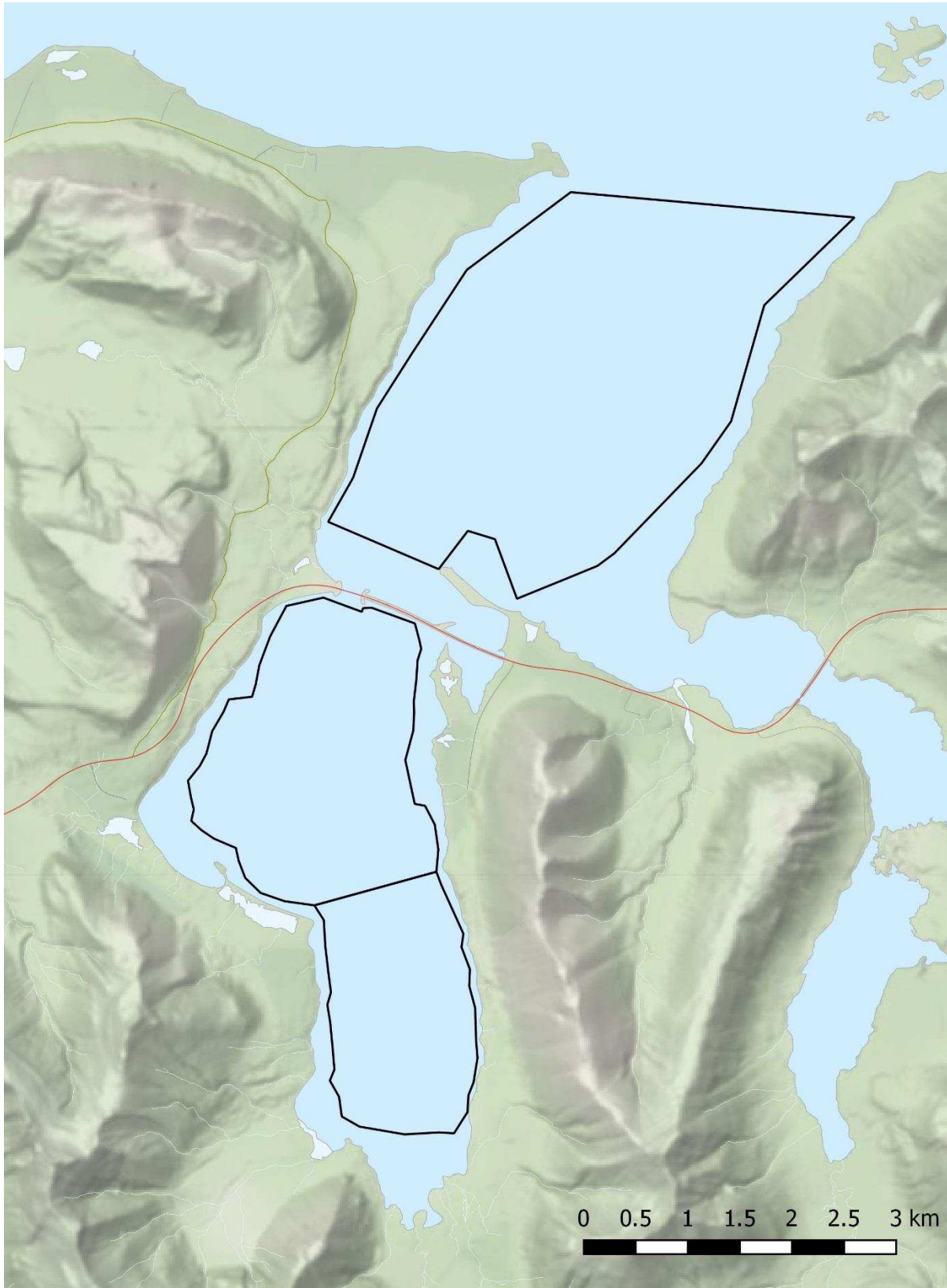
Mynd 40. Næmnigreining á staðsetningu reiknaðra strauma fyrir HNA.



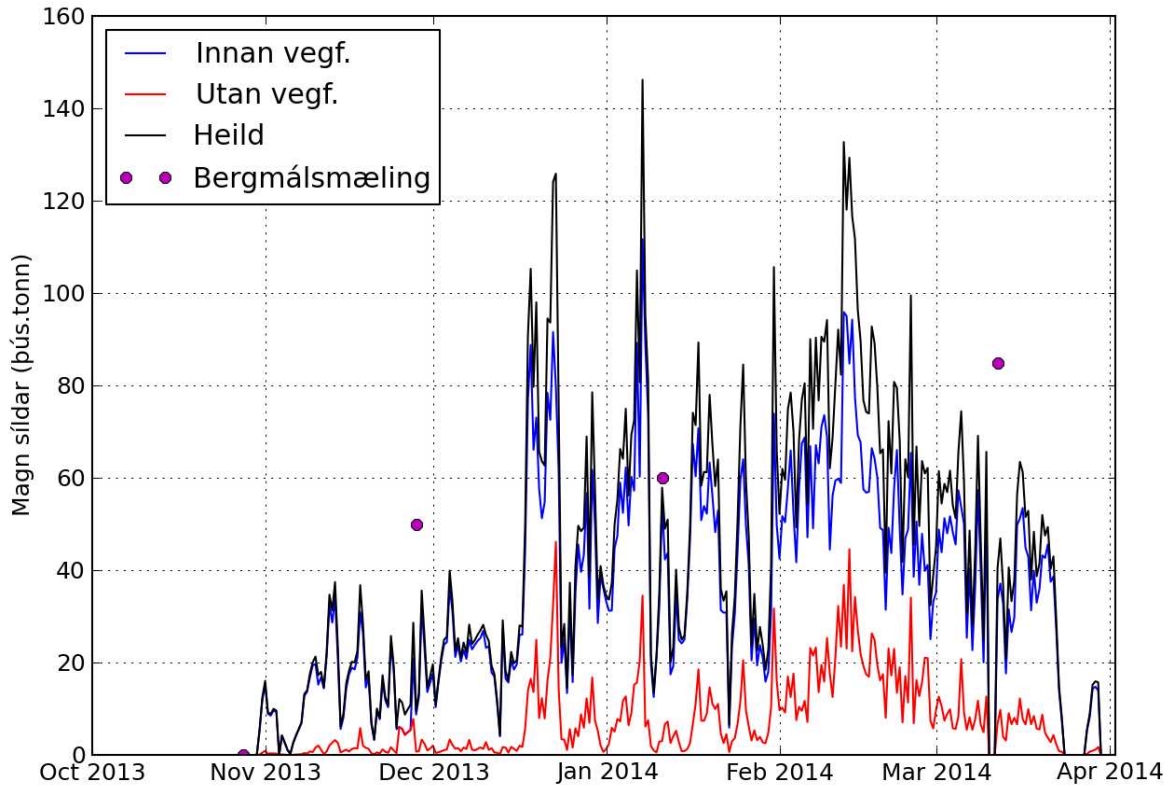
Mynd 41. Straumar í Kolgrafafirði. Mæld gildi eru táknuð með rauðum örvum en reiknuð gildi með svörtum. Lengd straumörva fylgir kvaðratrót hraðans sem örvarnar sýna og er því ekki línulegt samband milli hraða og lengd örva.



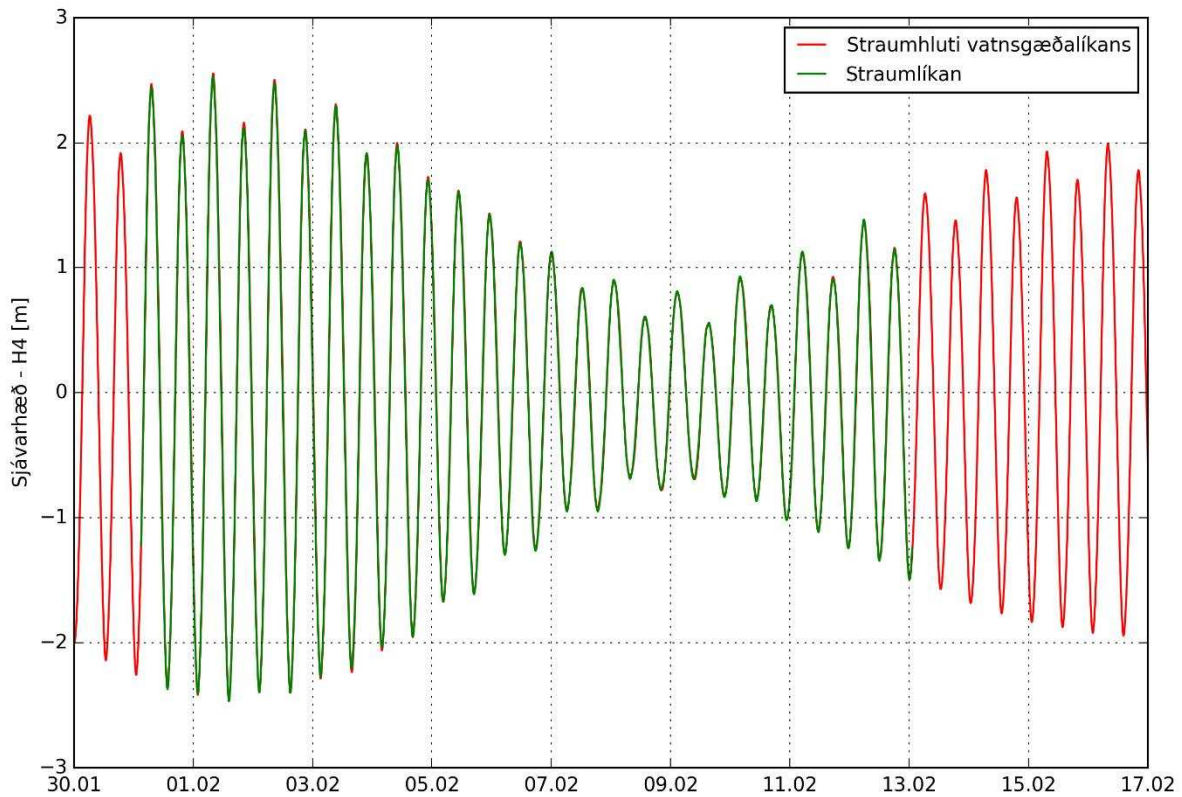
Mynd 42. Samanburður á bakgrunnssúrefnisupptöku. Föst bakgrunnssupptaka 1,8 g O₂/m²/d er borin saman við breytilega bakgrunnssupptöku (SOD) þar sem 1,8 g O₂/m²/d er innan vegfyllingar en 1,0 g O₂/m²/d utan hennar. Dagar í október 2013.



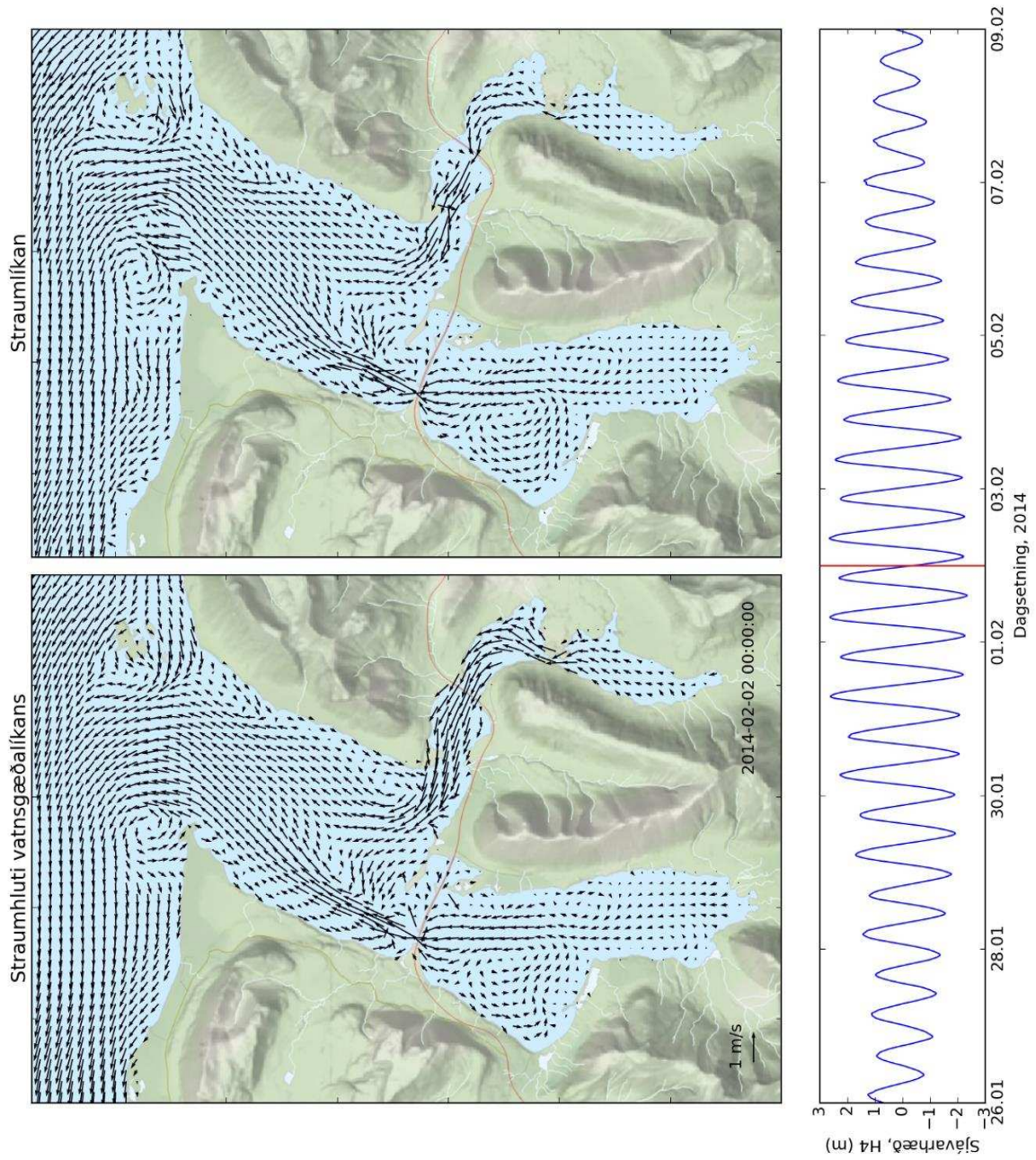
Mynd 43. Svæði sem sýna hvar síld var dreift í líkani innan og utan vegfyllingar í Kolgrafafirði. Síld hvers svæðis var dreift jafnt yfir rúmmál svæðisins.



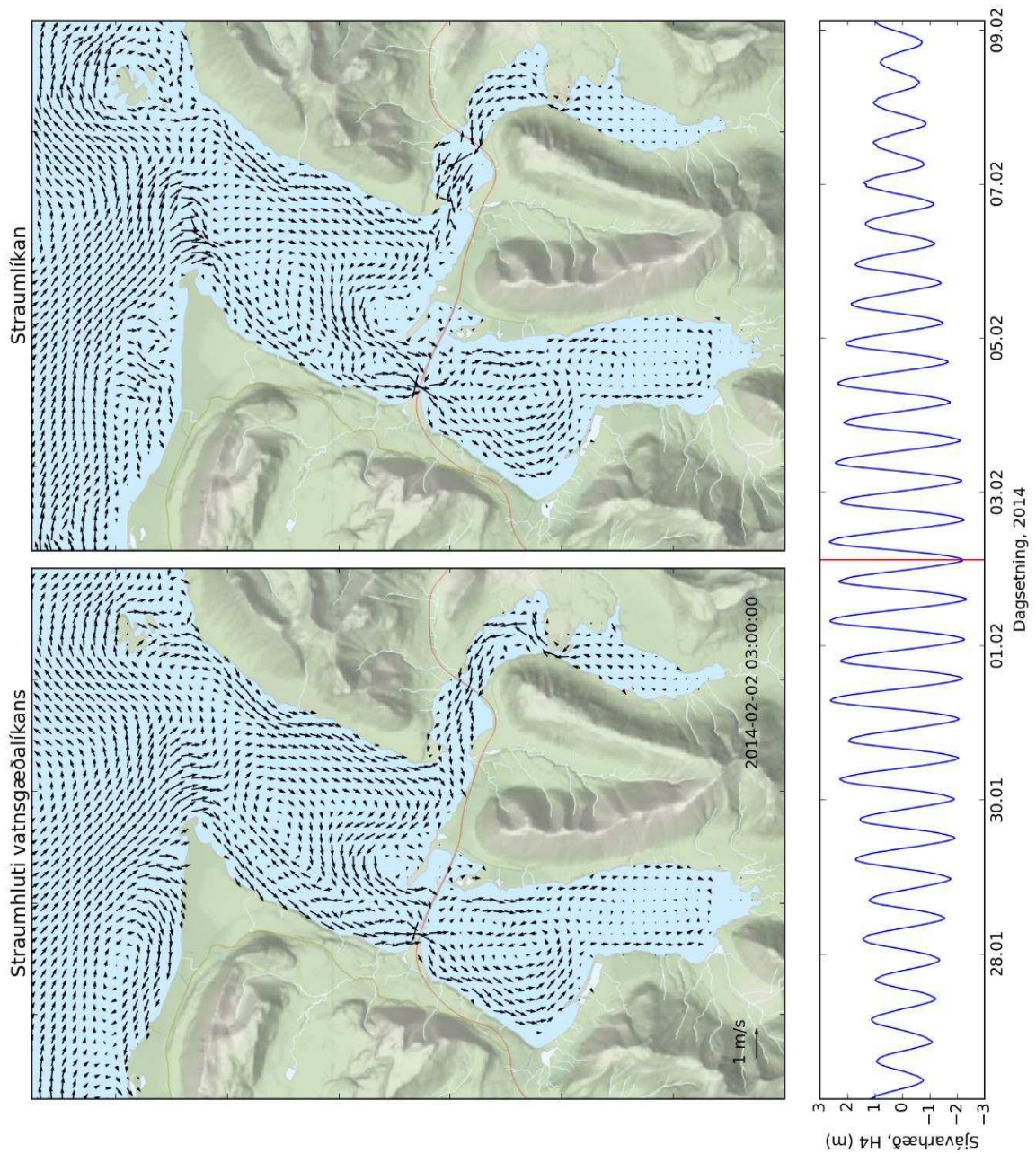
Mynd 44. Áætlað mat síldarmagns utan og innan vegfyllingar sem og heildarmagn innan Kolgrafafjarðar.



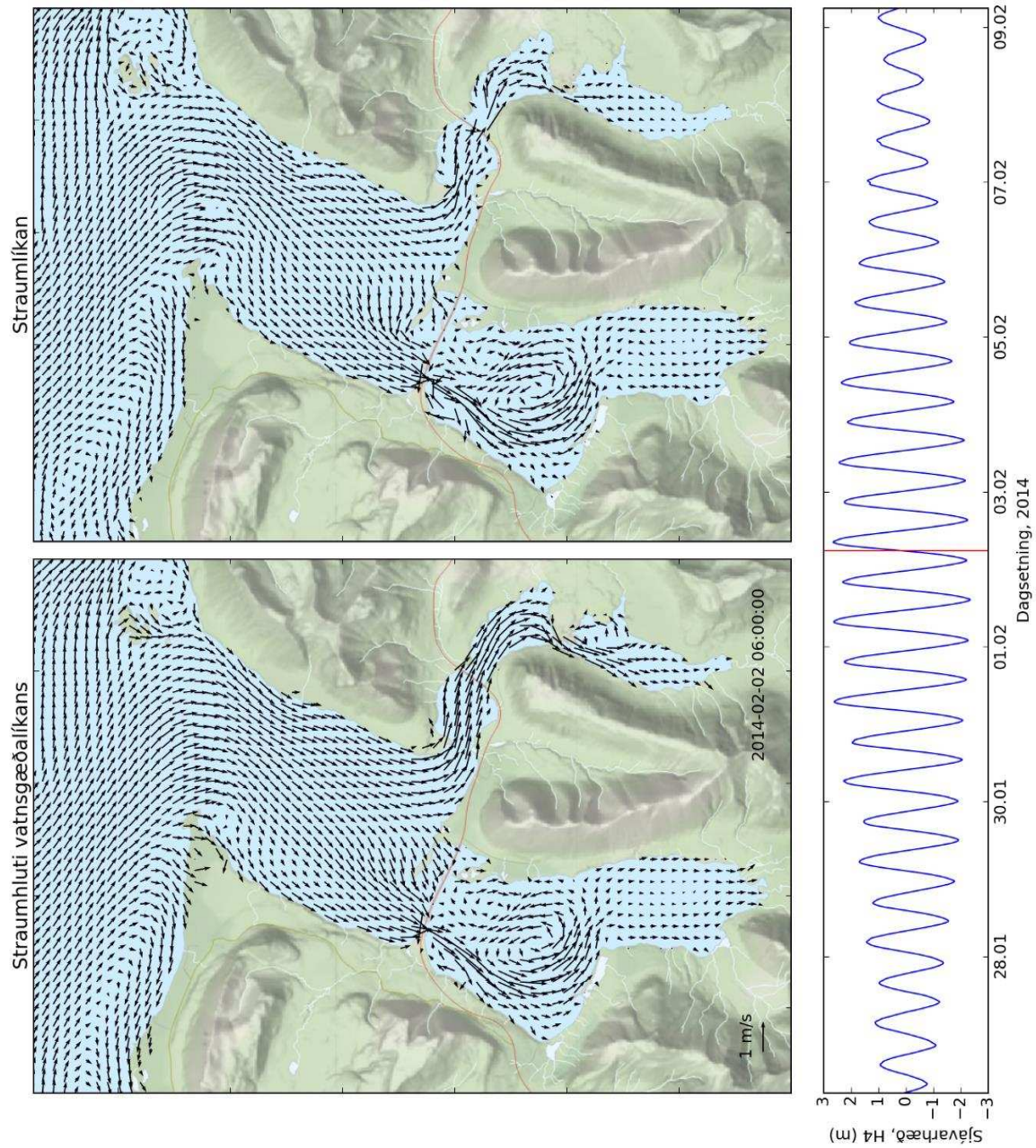
Mynd 45. Samanburður reiknaðrar sjávarhæðar frá straumlíkani og straumhluta vatnsgæðalíkans við H4.



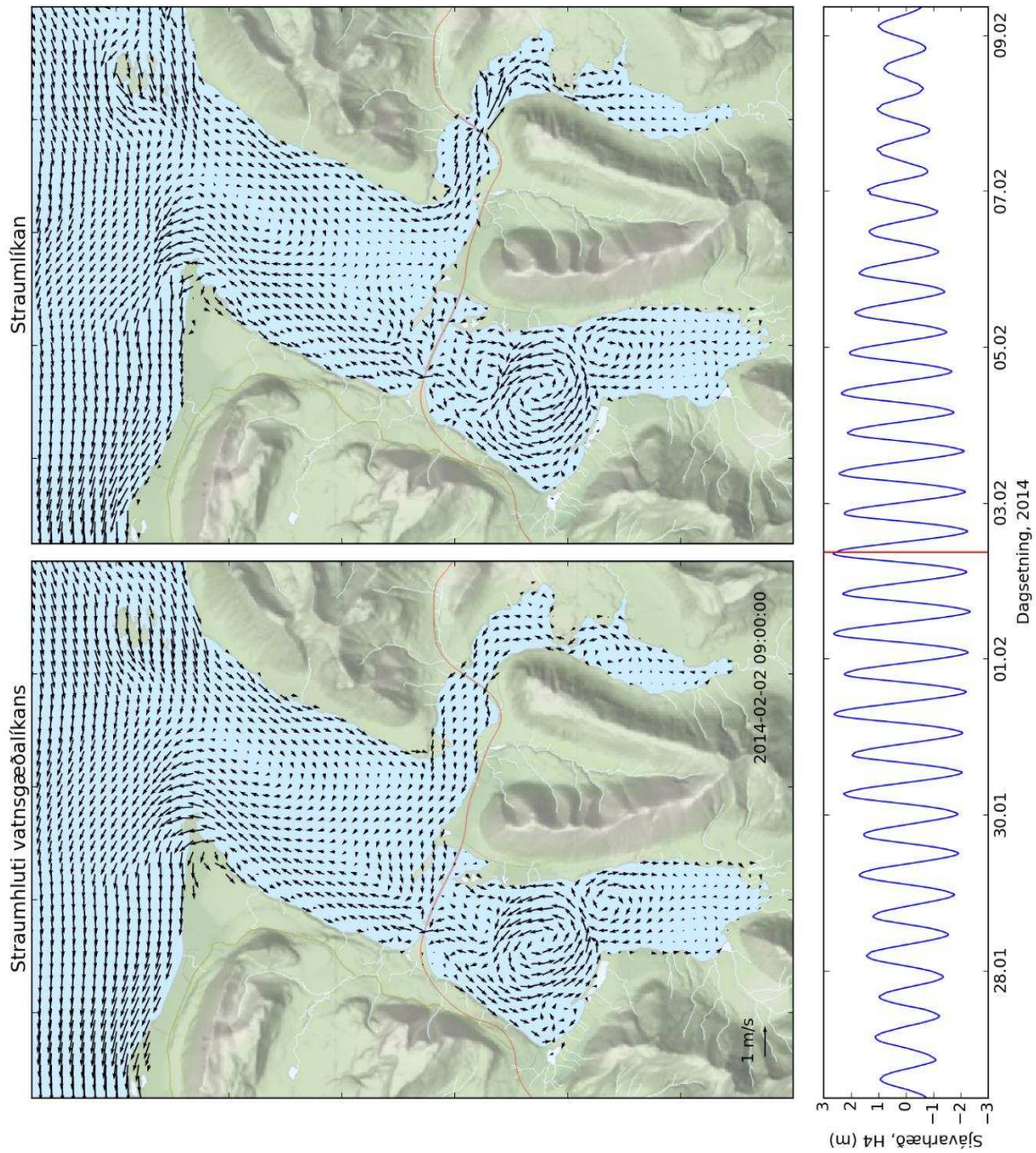
Mynd 46. Samanburður reiknaðra strauma frá straumhluta vatnsgæðalíkans og straumlíkani á útfalli.



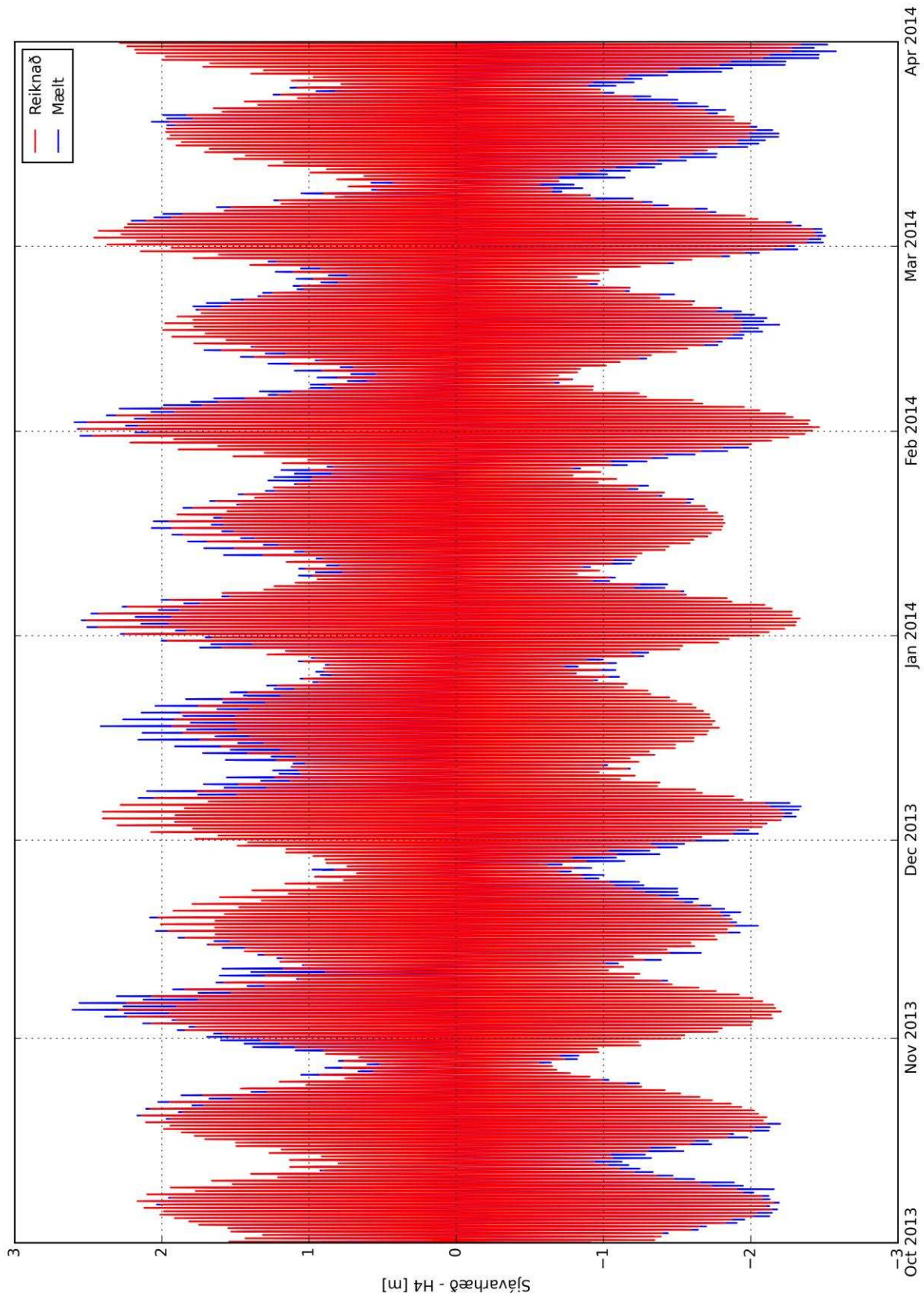
Mynd 47. Samanburður reiknaðra strauma frá straumhluta vatnsgæðalíkans og straumlíkani á liggjanda á fjöru.



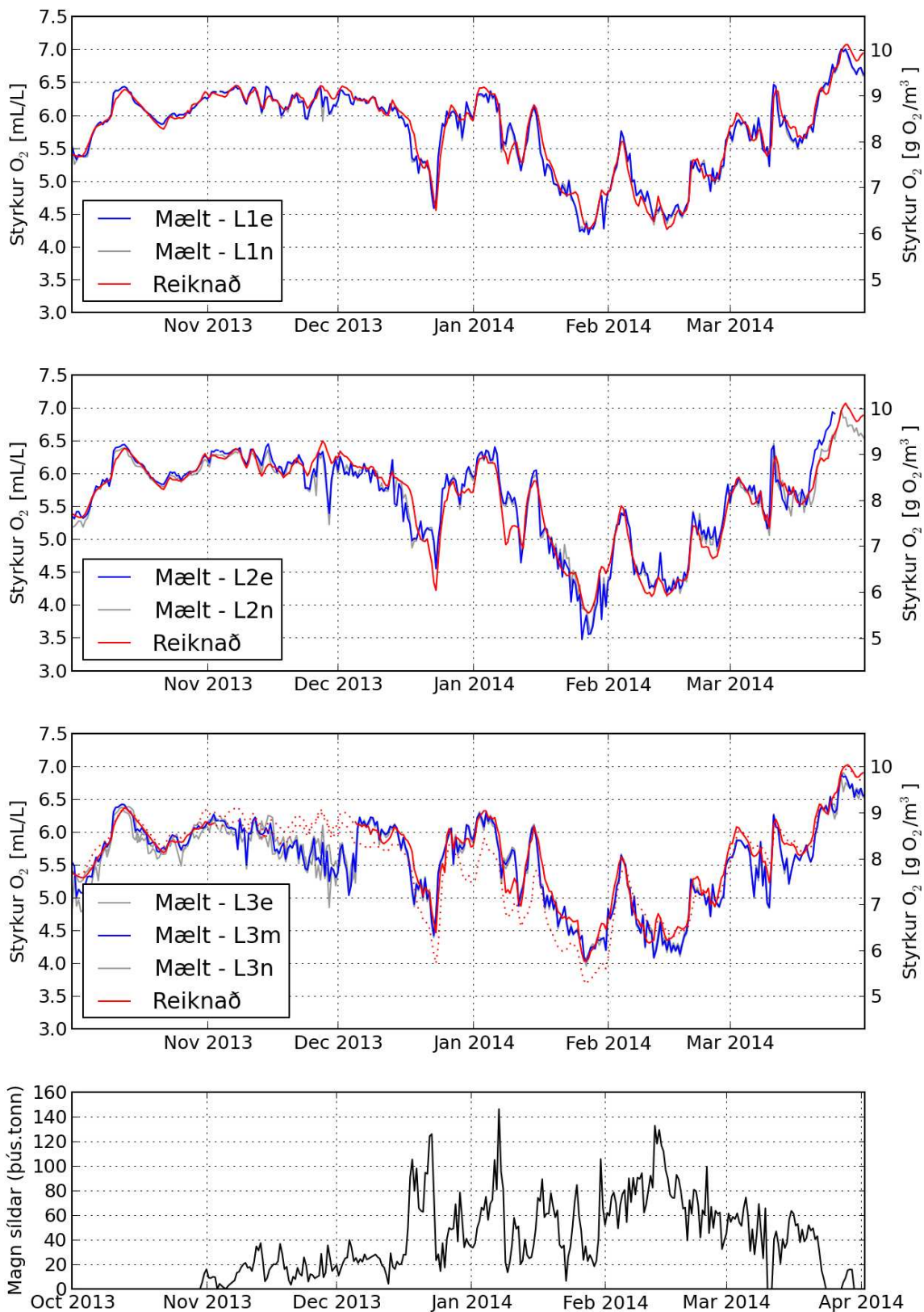
Mynd 48. Samanburður reiknaðra strauma frá straumhluta vatnsgæðalíkans og straumlíkani á aðfalli.



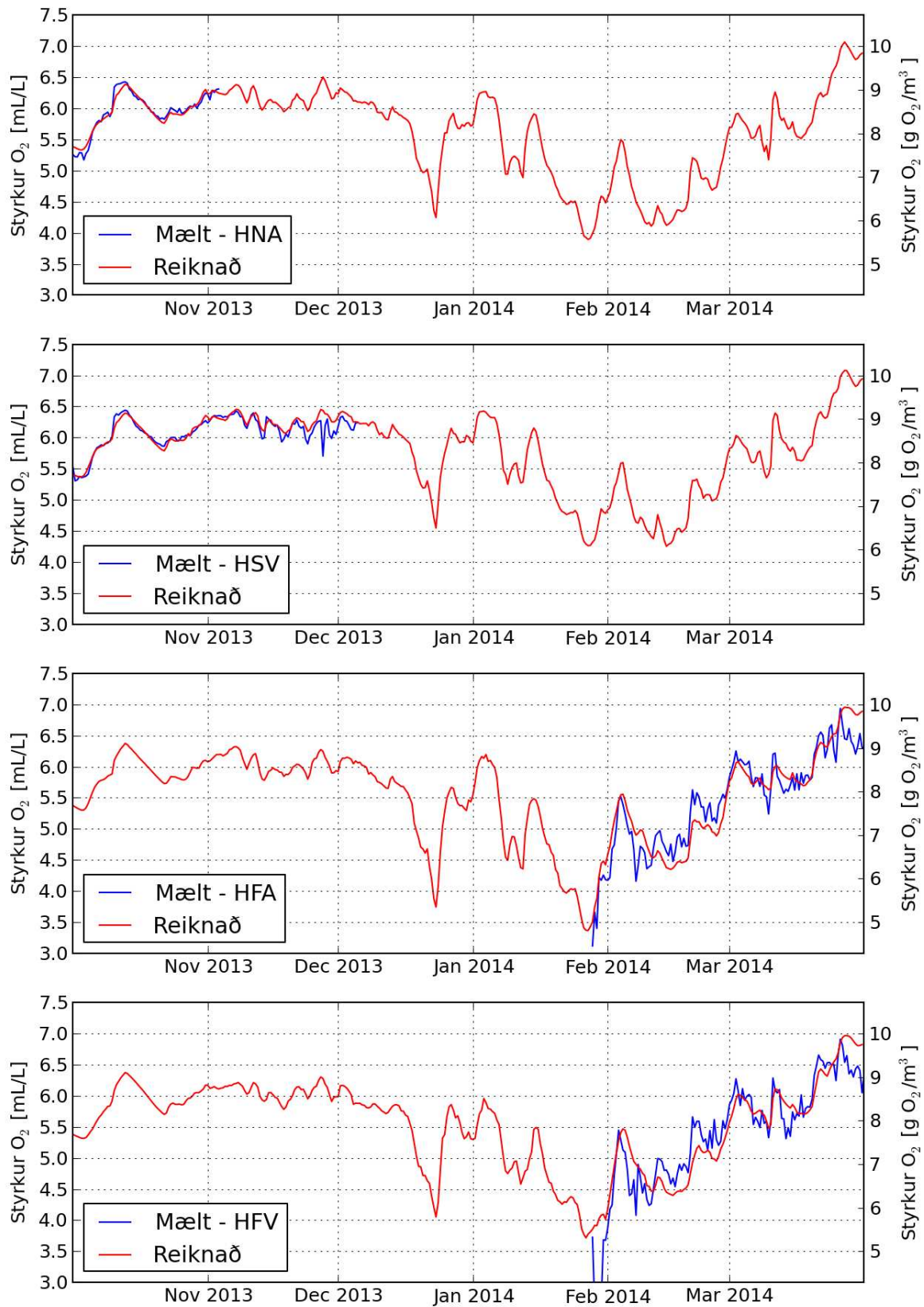
Mynd 49. Samanburður reiknaðra strauma frá straumhluta vatnsgæðalíkans og straumlíkani á liggjanda á flóði.



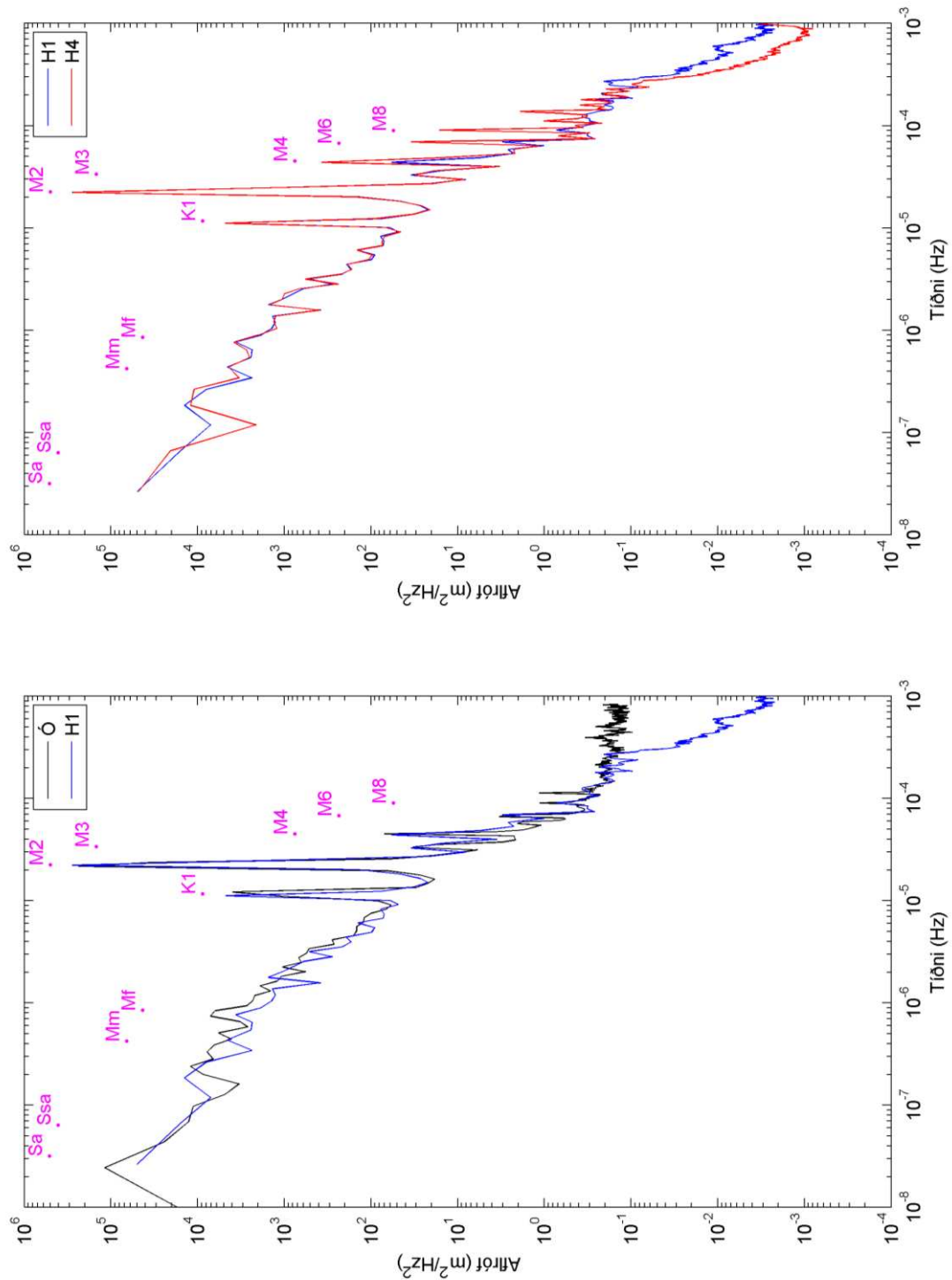
Mynd 50. Samanburður reiknaðrar og mældrar sjávarhæðar innan vegfyllingar í Kolgrafafirði við Eiðisstapa (H4) fyrir straumhluta vatnsgæðalíkansins.



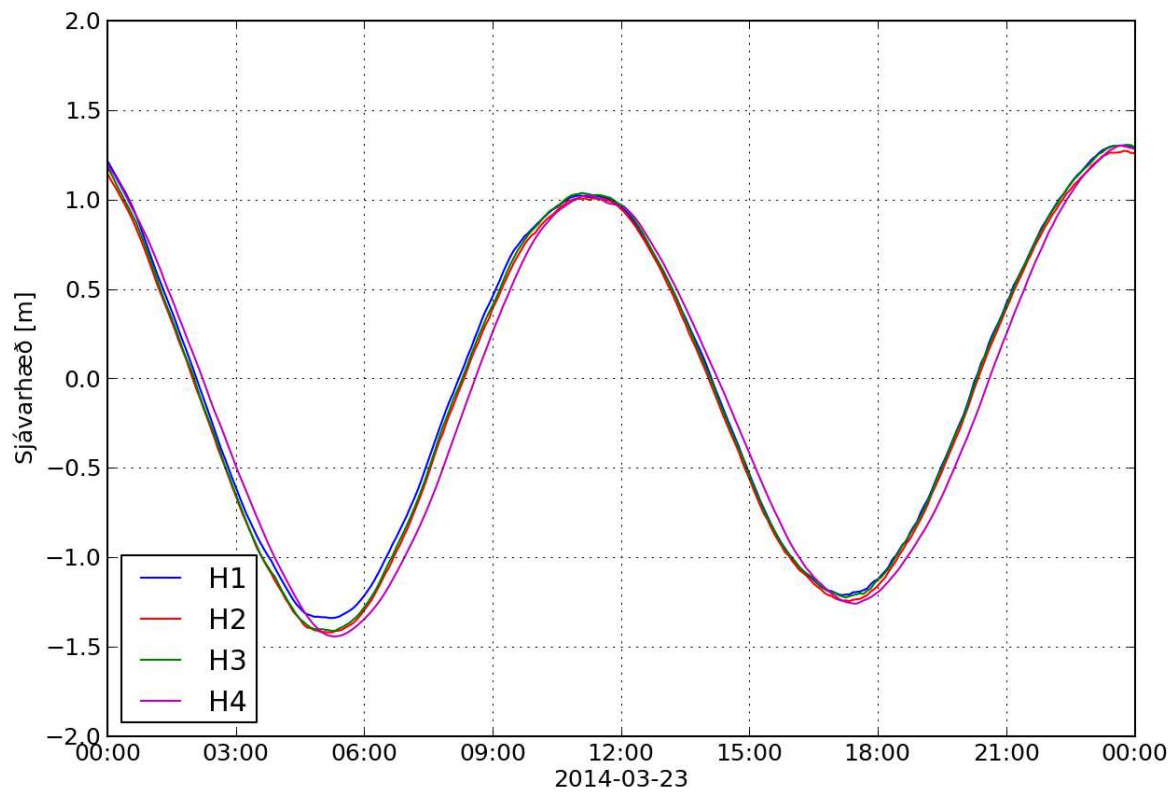
Mynd 51. Samanburður reiknaðs og mælds súrefnisstyrks, 12 klst meðaltöl, á L1, L2 og L3 fyrir breytlegt magn síldar í Kolgrafafirði (heildarmagn í Kolgrafafirði er sýnt). L3 færðist á mælitímabilinu og eru því sýndar reiknaðar niðurstöður fyrir upphafsstaðsetningu og áætlaða lokastaðsetningu.



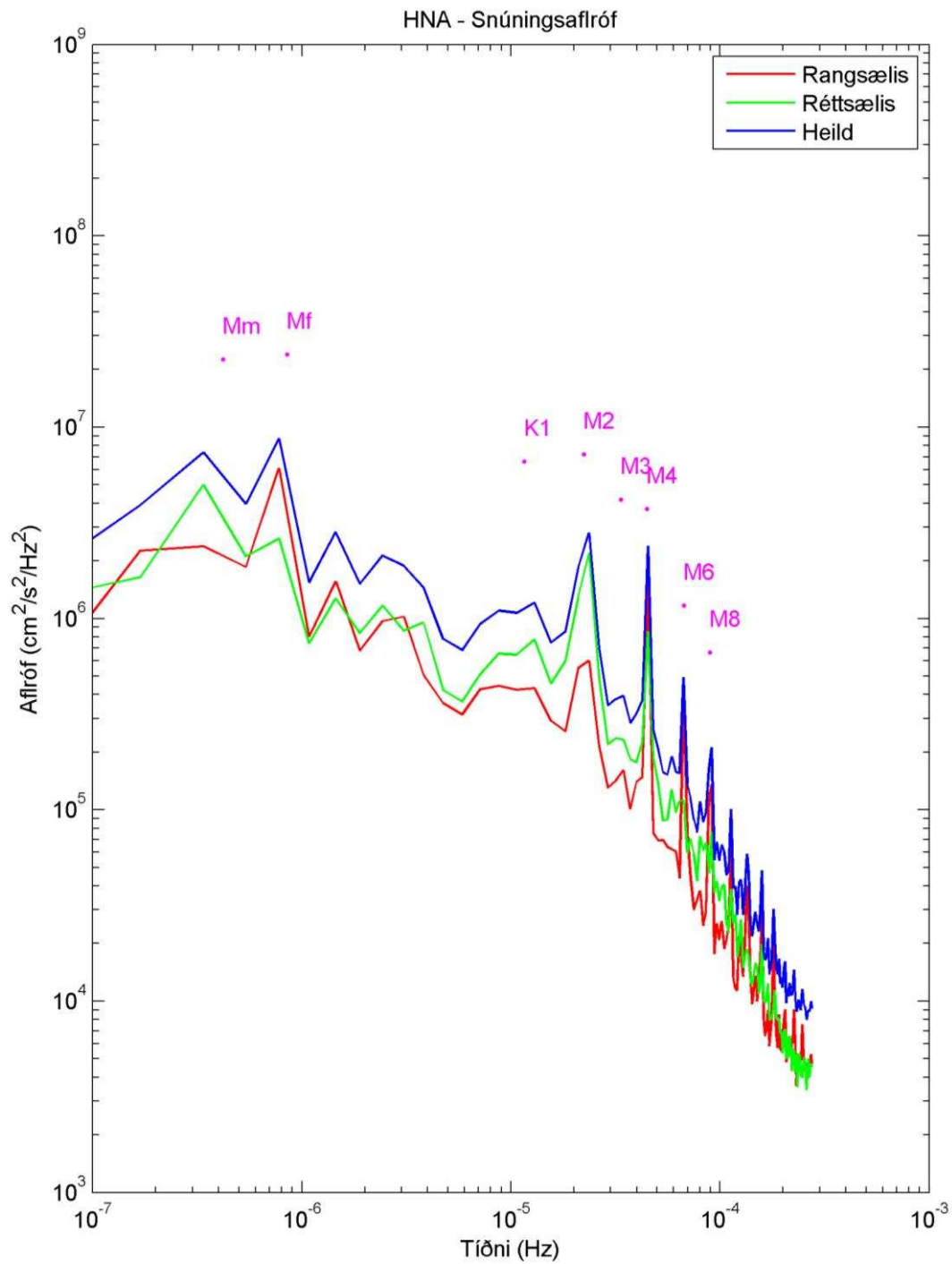
Mynd 52. Samanburður reiknaðs og mælds súrefnisstyrks, 12 klist, meðaltöl, á HNA, HSV, HFA og HFV.



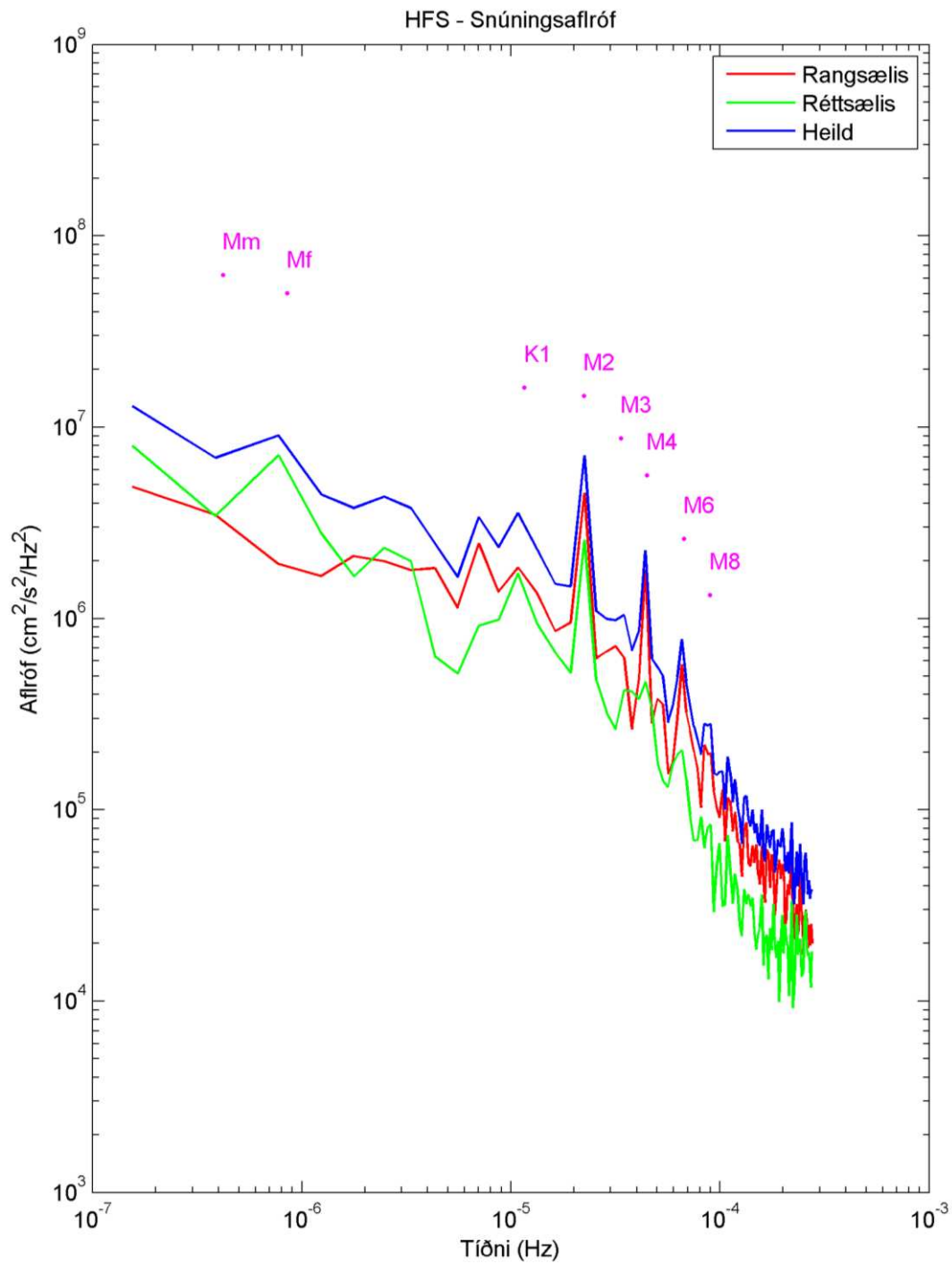
Mynd 53. Aflróf sjávarhæðarmælinga í Ólafsvík (Ó), við mynni Kolgrafafjarðar (H1) og í innri Kolgrafafirði (H4). Helstu þættir sjávarfalla eru sýndir til samanburðar á tilsvareandi tíðnum.



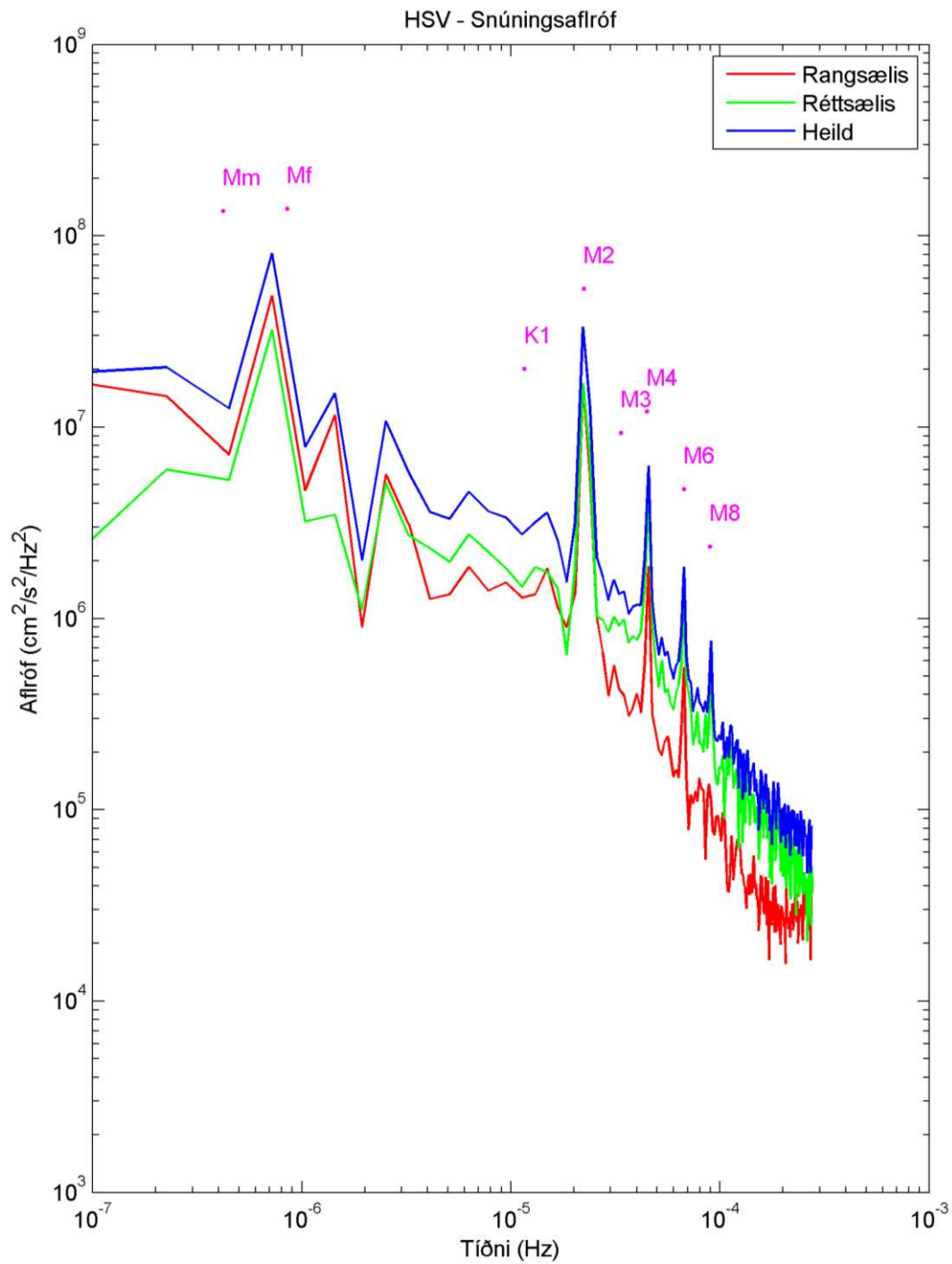
Mynd 54. Greina má fasamun í sjávarföllum milli stöðva í Kolgrafafirði. Mestur munur er milli H1 og H4.



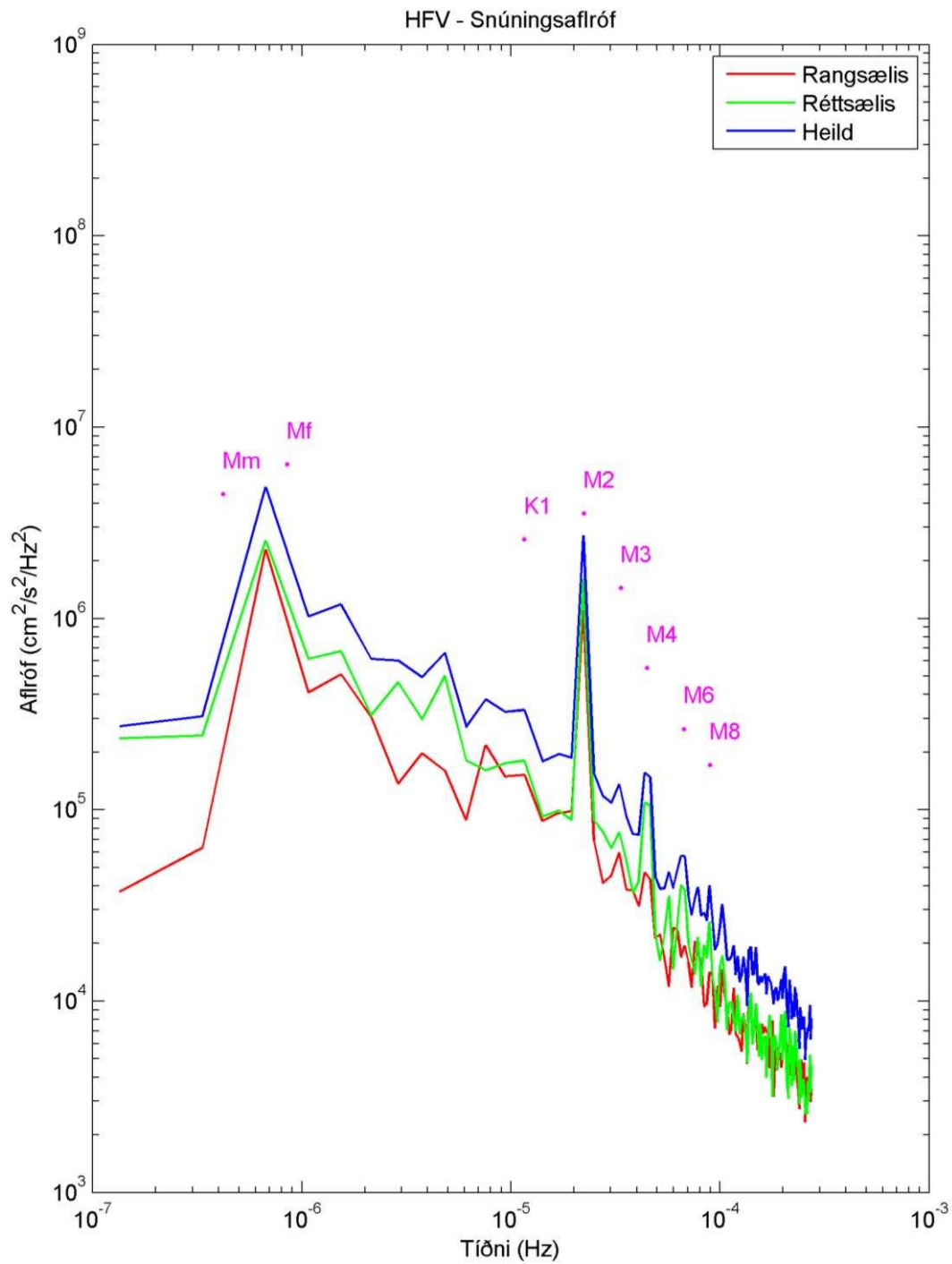
Mynd 55. Aflróf meðalstraumhraða yfir dýpi á HNA brotið upp í snúningsþætti.



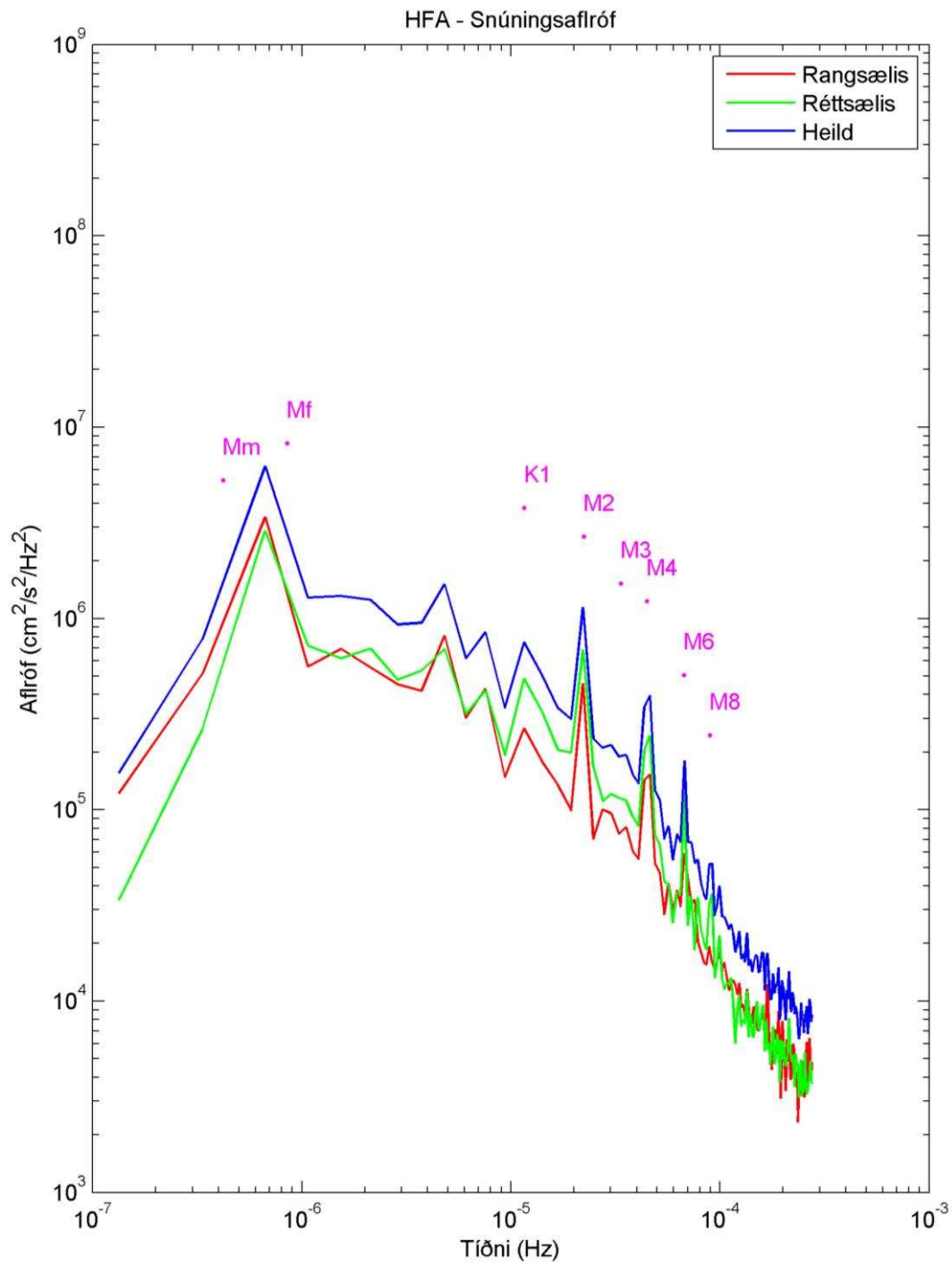
Mynd 56. Aflirof meðalstraumhraða yfir dýpi á HFS brotið upp í snúningsþætti.



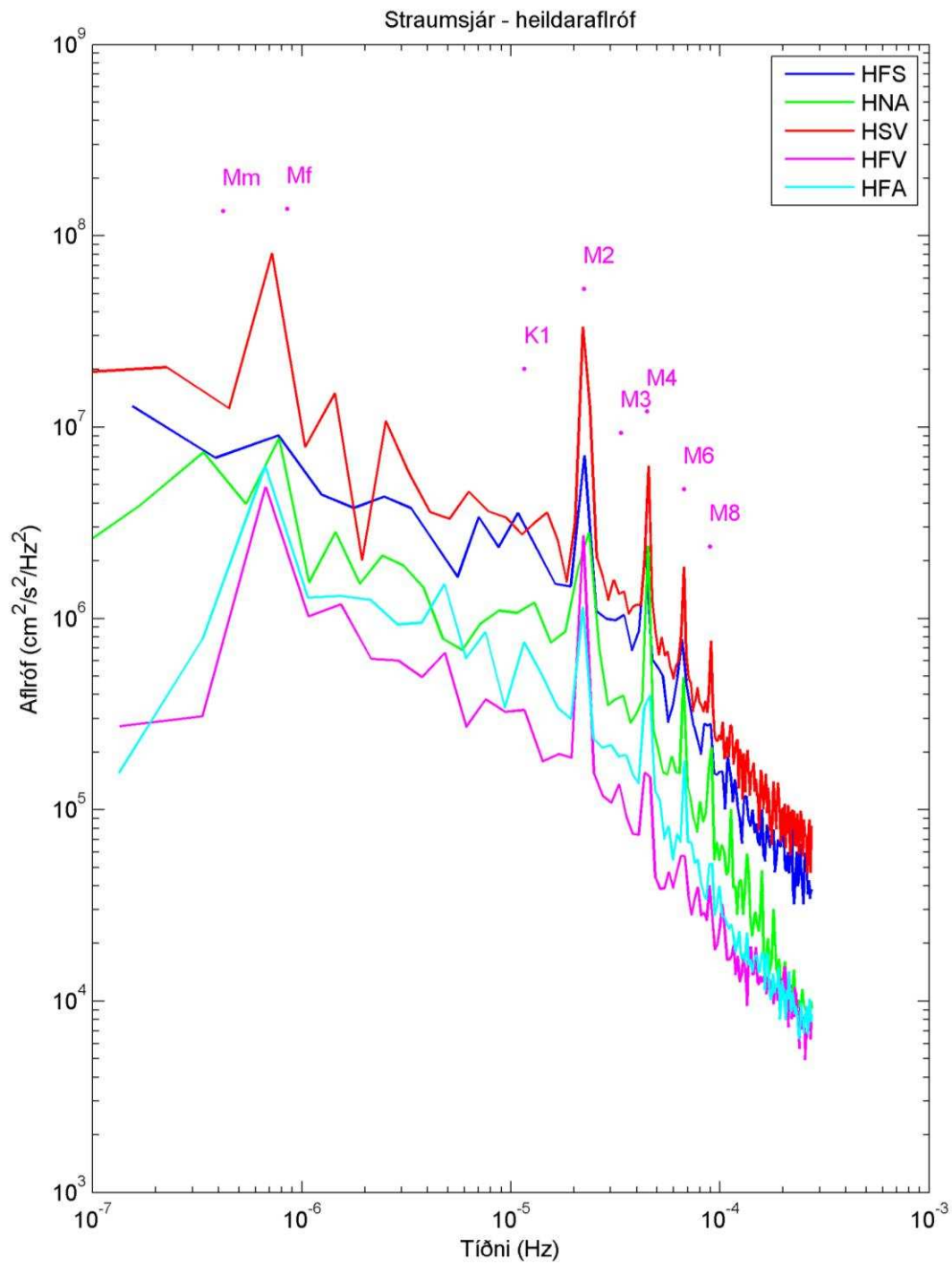
Mynd 57. Aflróf meðalstraumhraða yfir dýpi á HSV brotið upp í snúningsþætti.



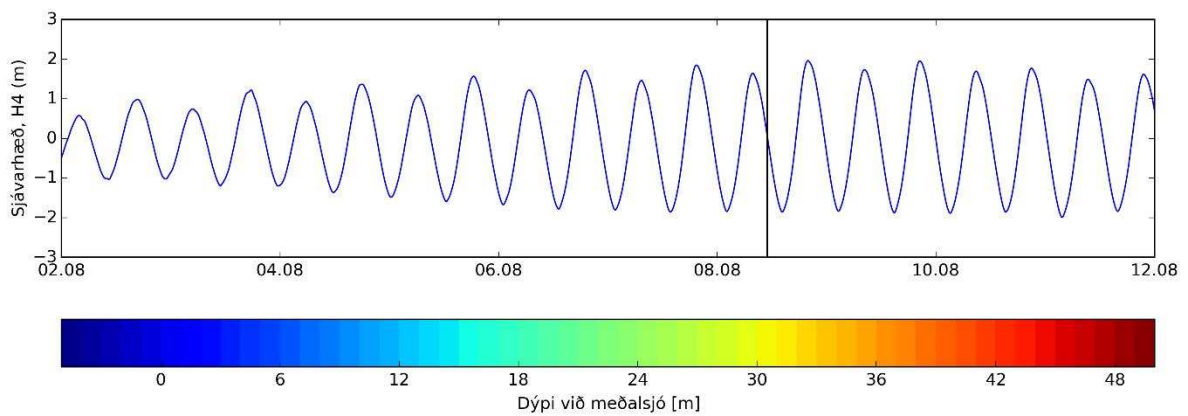
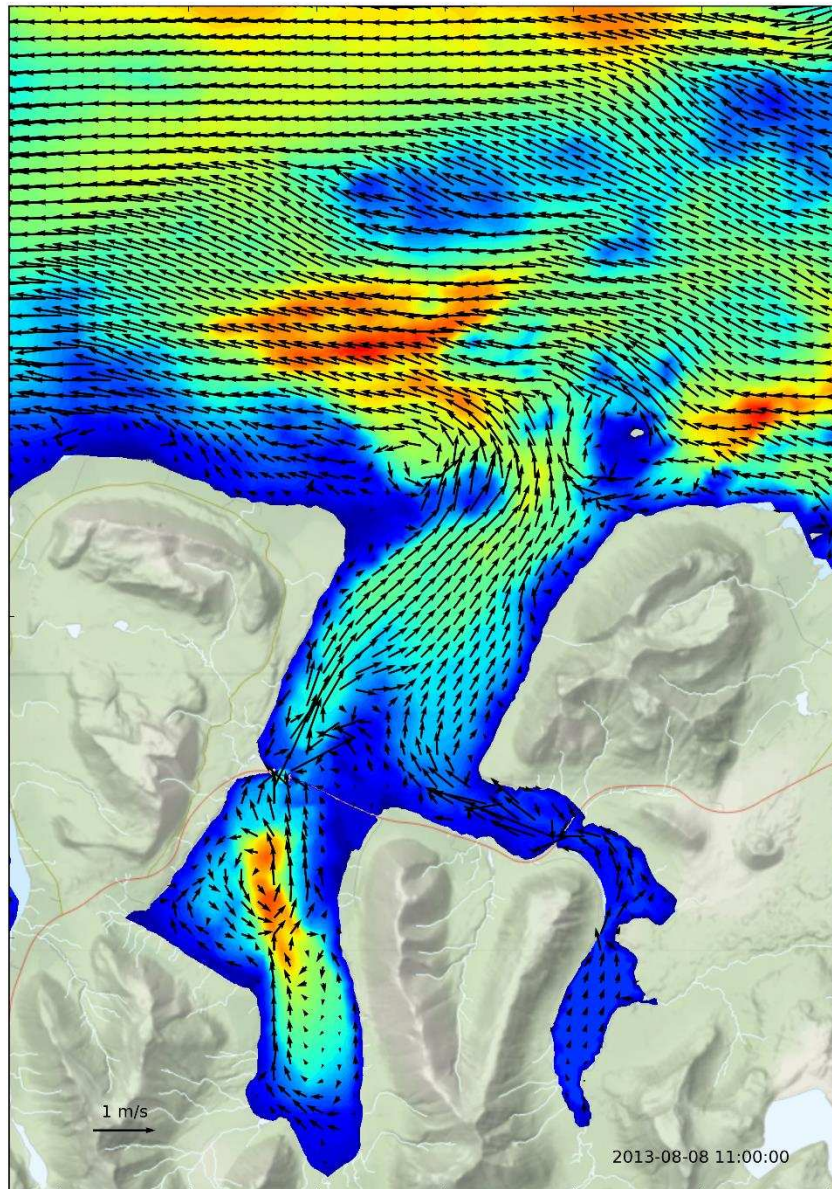
Mynd 58. Aflróf meðalstraumhraða yfir dýpi á HFV brotið upp í snúningsþætti.



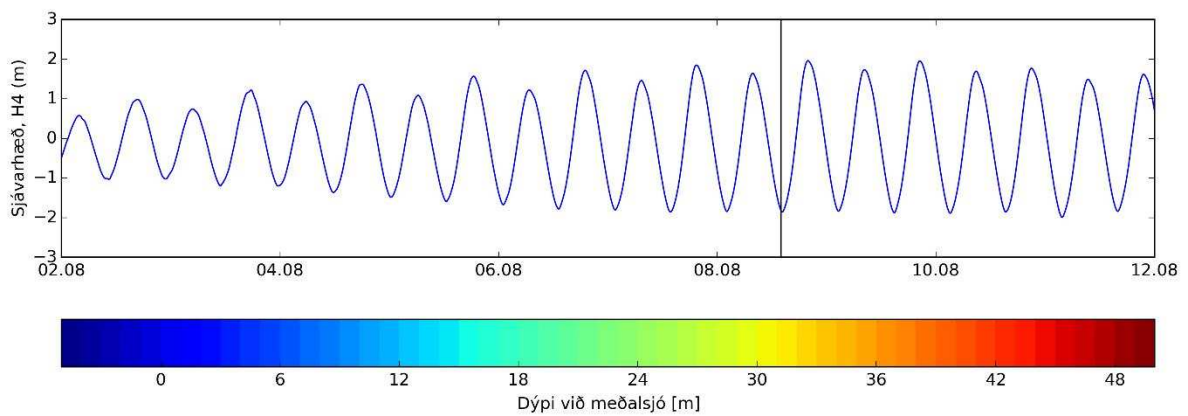
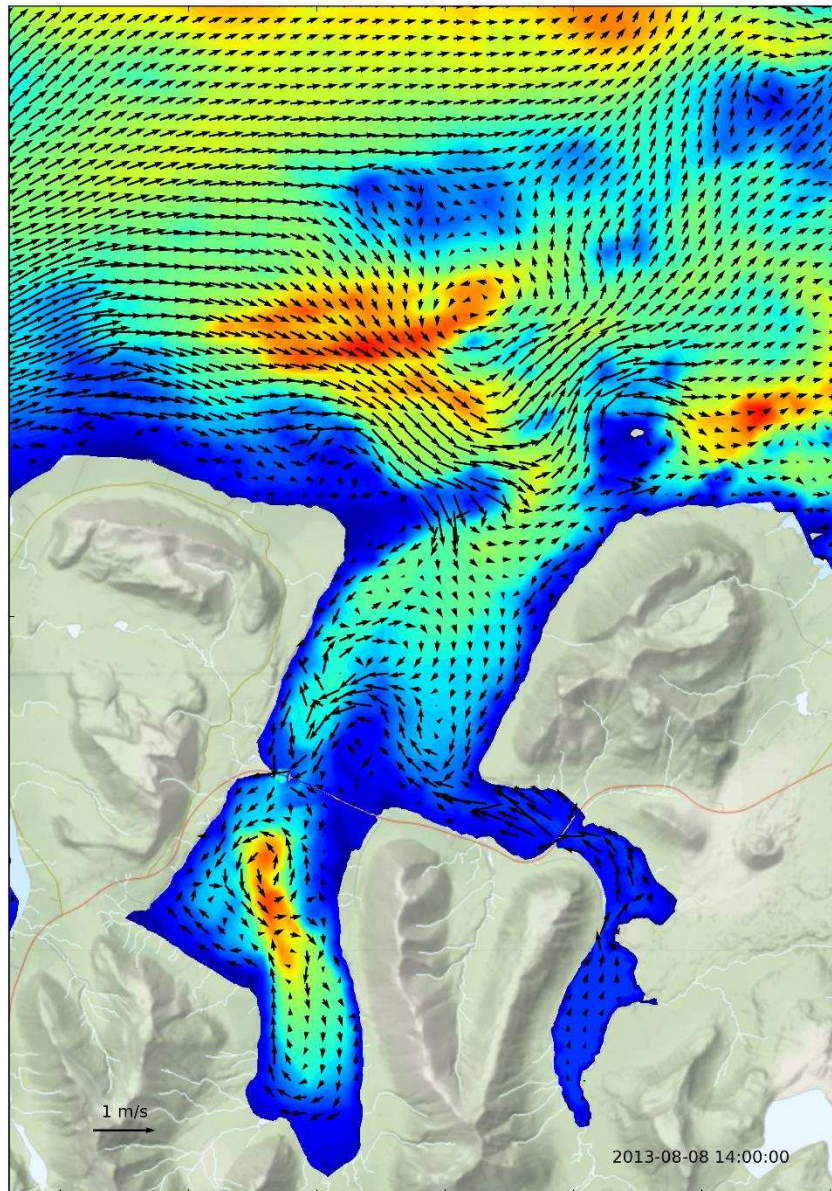
Mynd 59. Aflróf meðalstraumhraða yfir dýpi á HFA brotið upp í snúningsþætti.



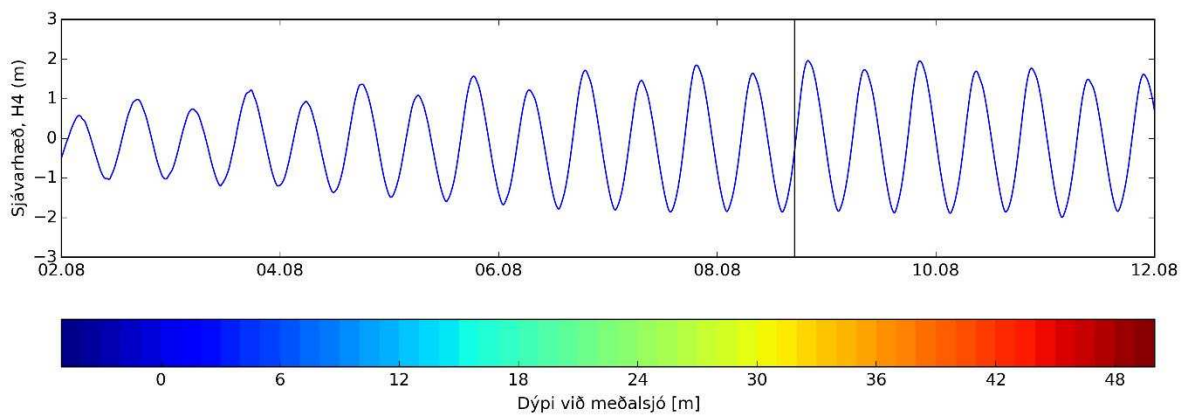
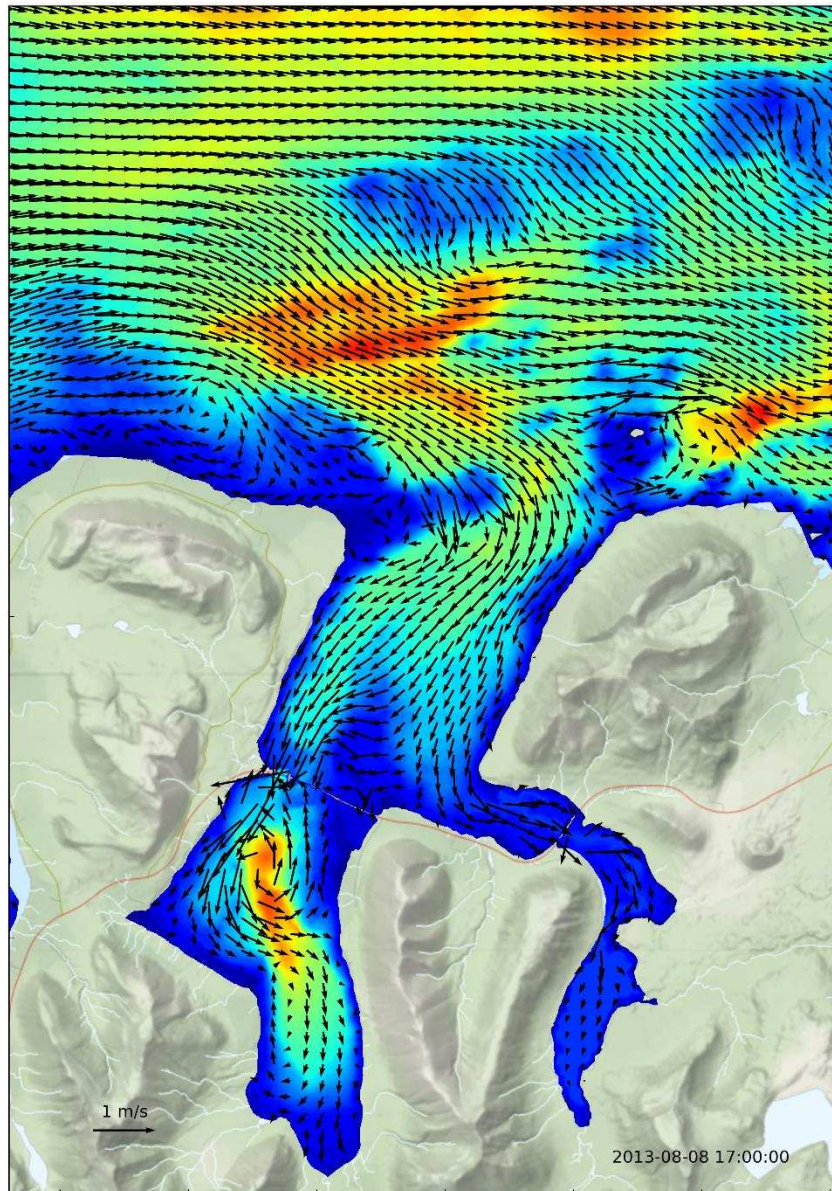
Mynd 60. Aflróf meðalstraumhraða yfir dýpi frá öllum straumsjármælistöðum.



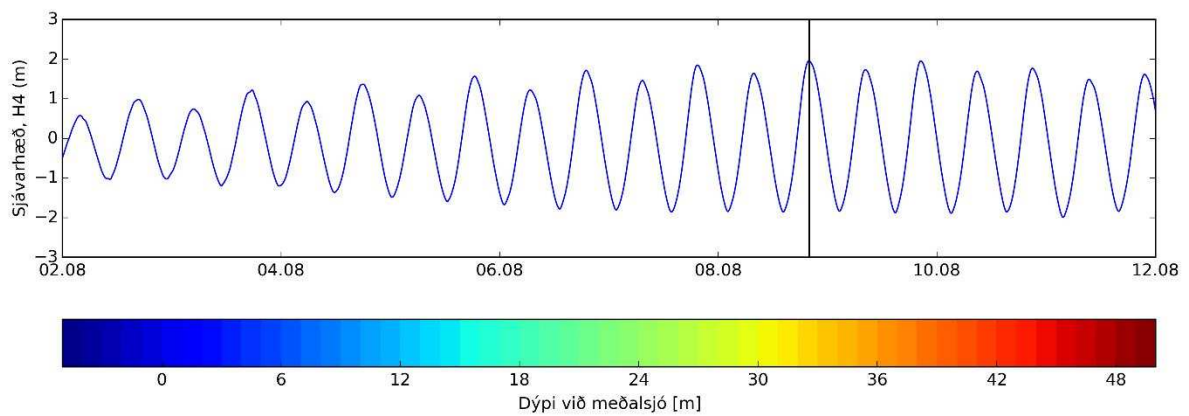
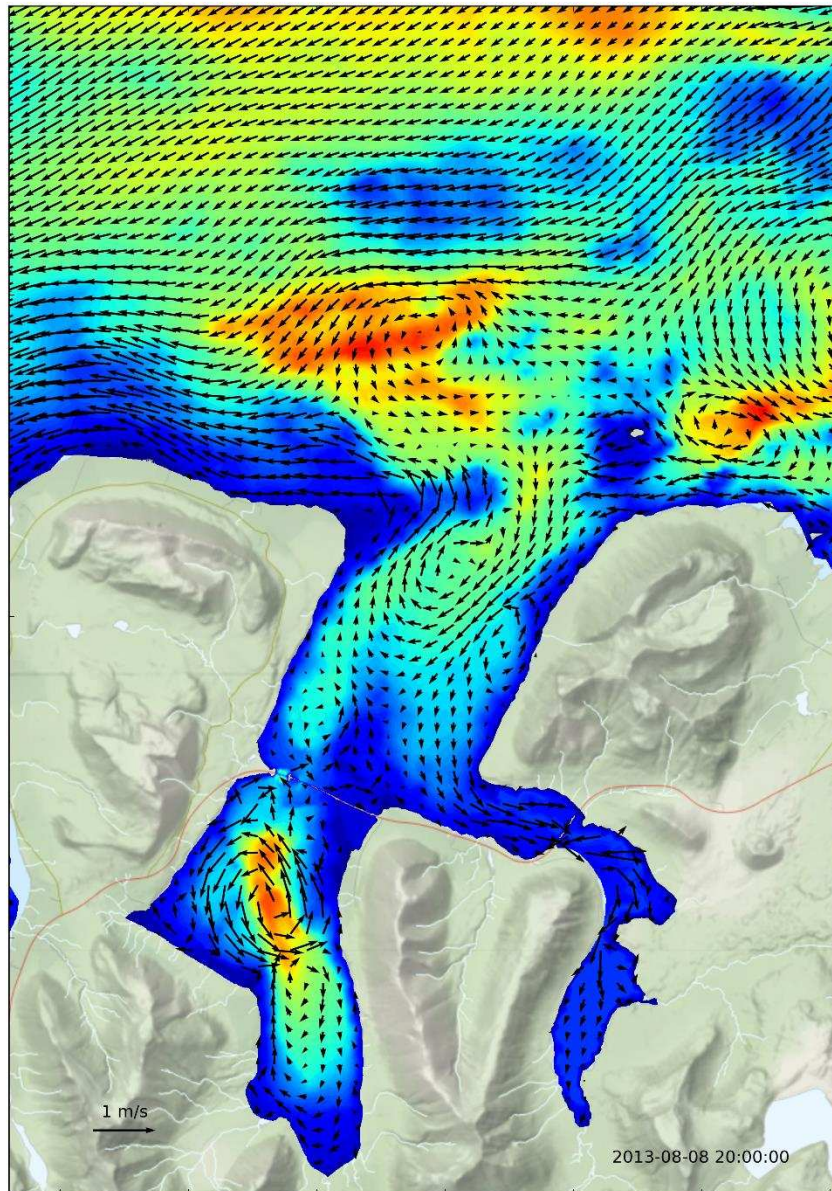
Mynd 61. Reiknaðar straumörvar á útfalli lagðar ofan á dýpi Kolgrafafjarðar.



Mynd 62. Reiknaðar straumörvar á liggjanda á fjöru lagðar ofan á dýpi Kolgrafafjarðar.



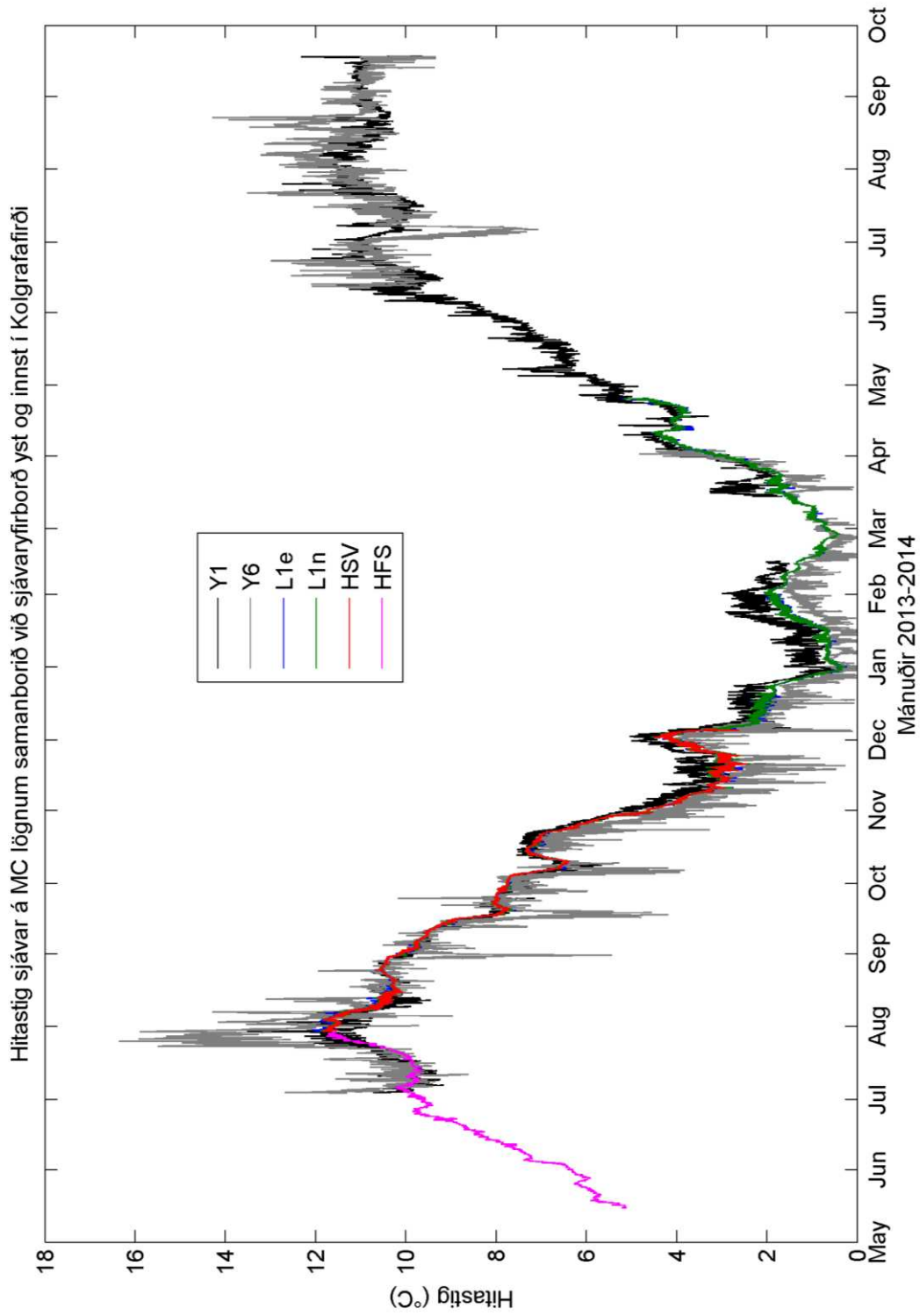
Mynd 63. Reiknaðar straumörvar á aðfalli lagðar ofan á dýpi Kolgrafafjarðar.



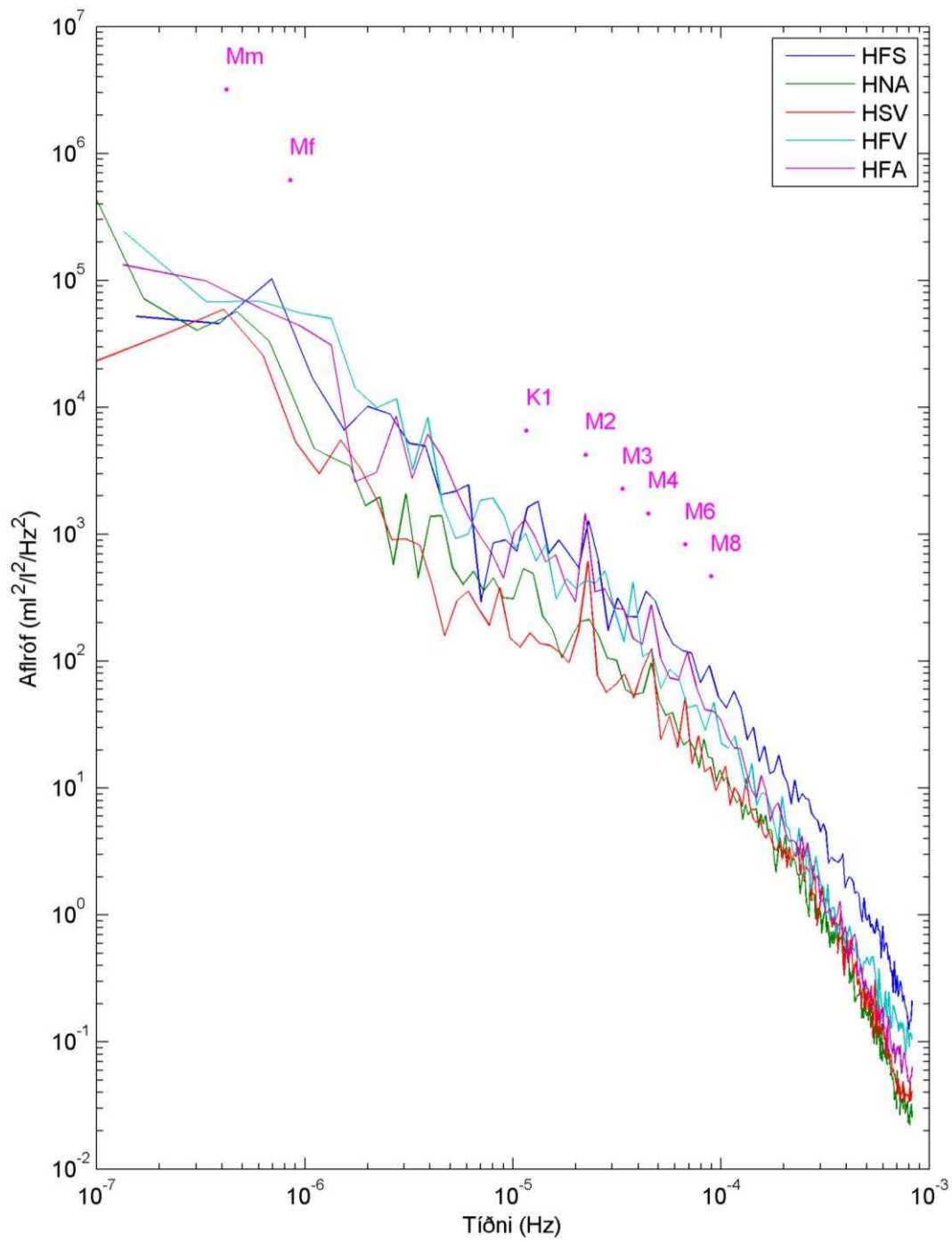
Mynd 64. Reiknaðar straumörvar á liggjanda á flóði lagðar ofan á dýpi Kolgrafafjarðar.



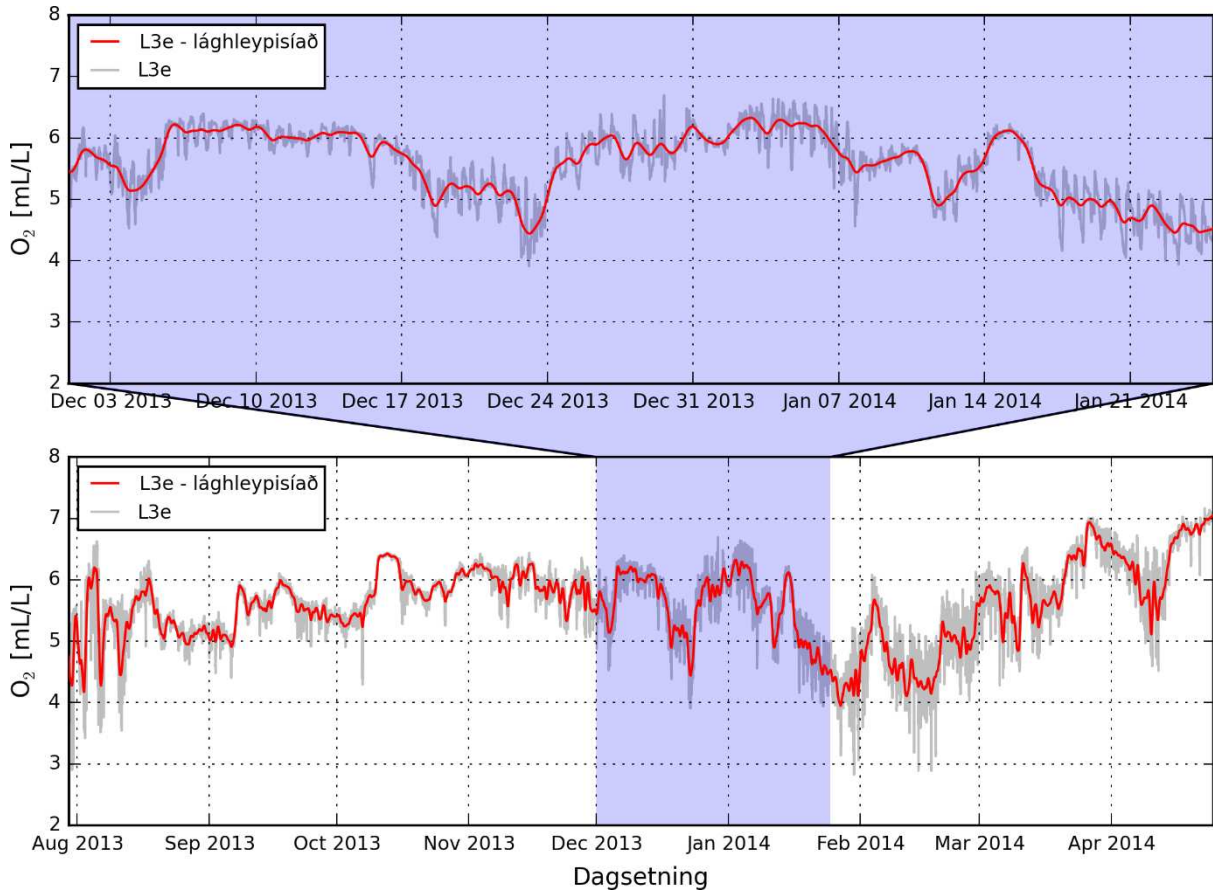
Mynd 65. Dagleg meðaltöl mælds yfirborðshita í Kolgrafafirði.



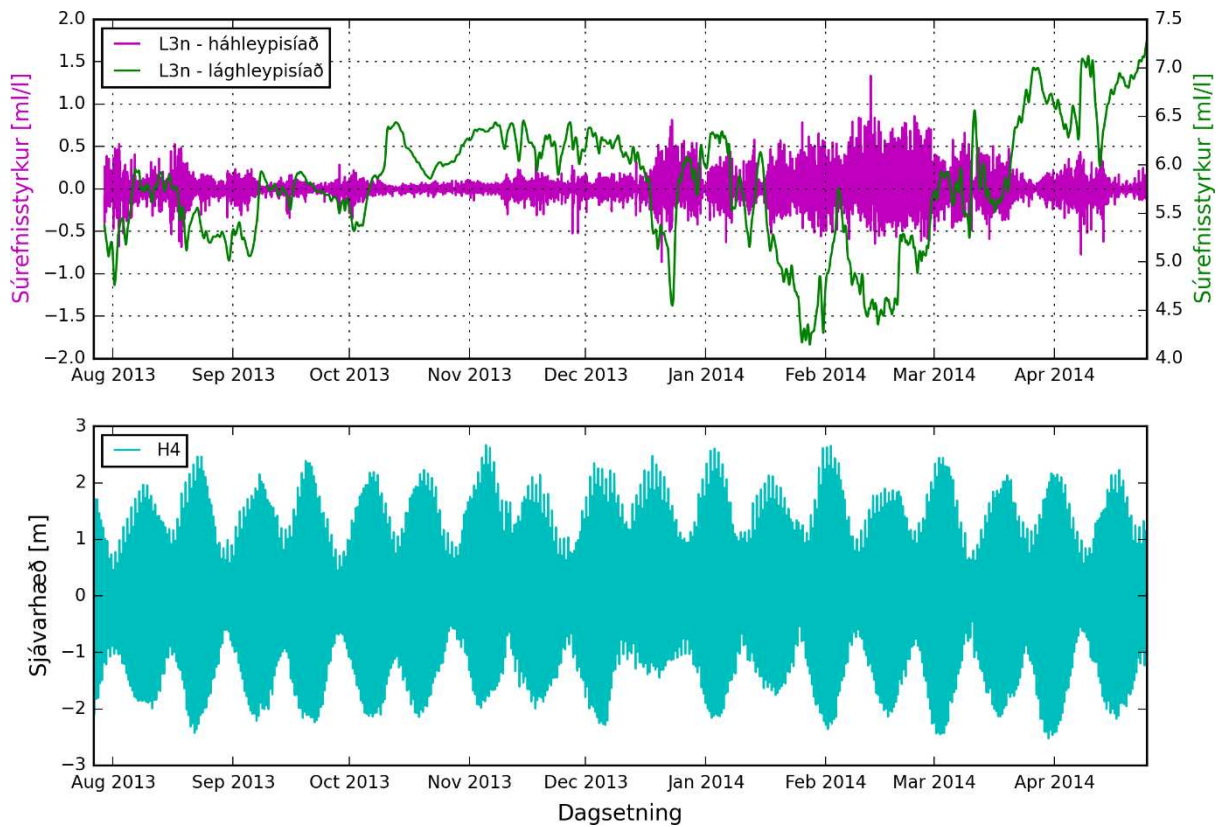
Mynd 66. Mælt hitastig sjávar á völdum stöðum.



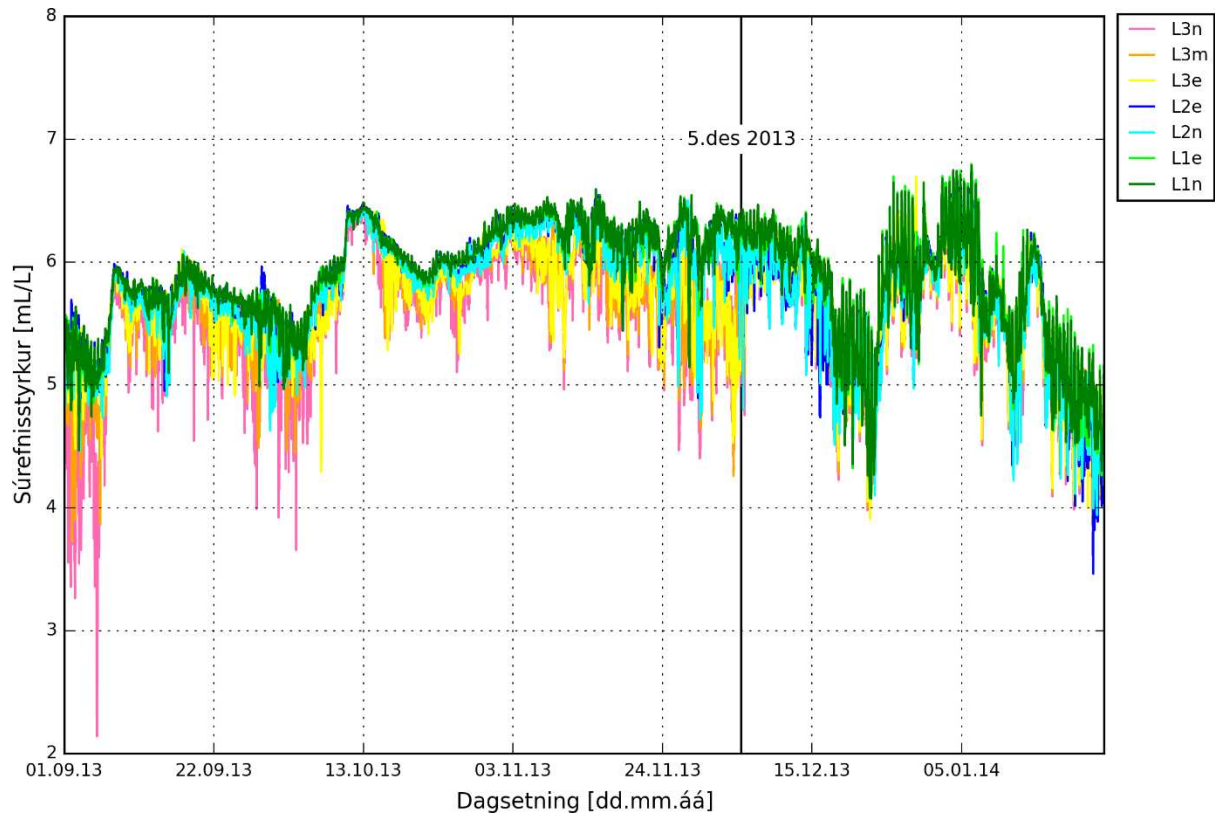
Mynd 67. Aflróf mælds súrefnis frá MicroCAT á straumsjárlögnum.



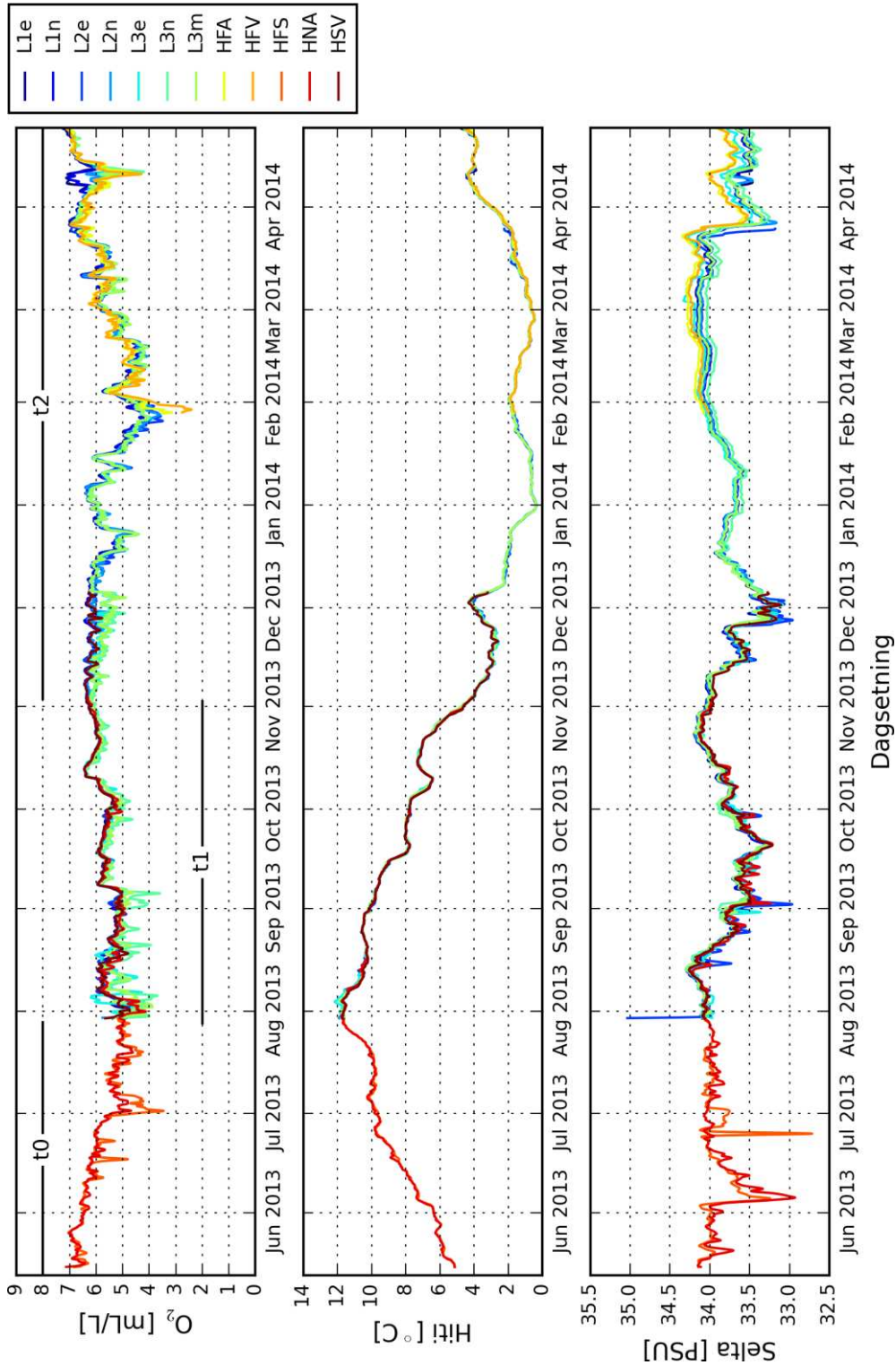
Mynd 68. Tímaraðgreining mælds súrefnisstyrks á L3e, lághleypisíun.



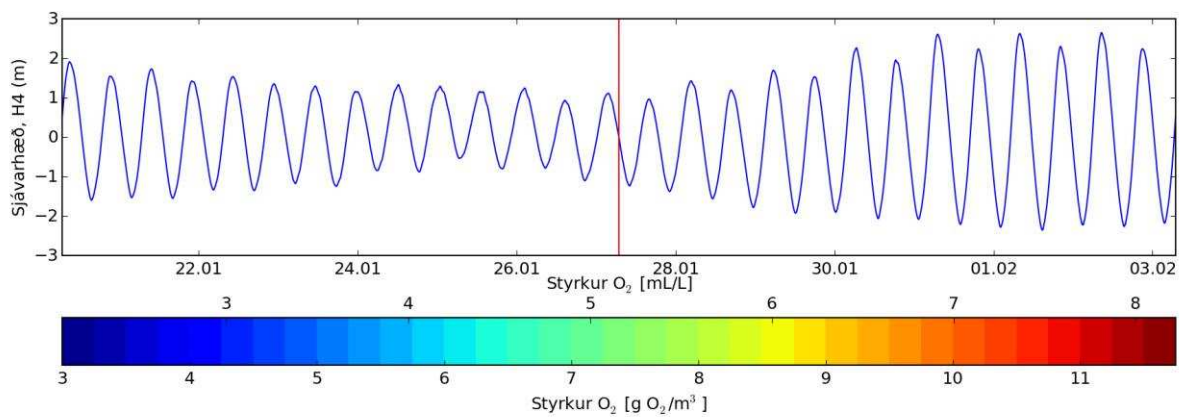
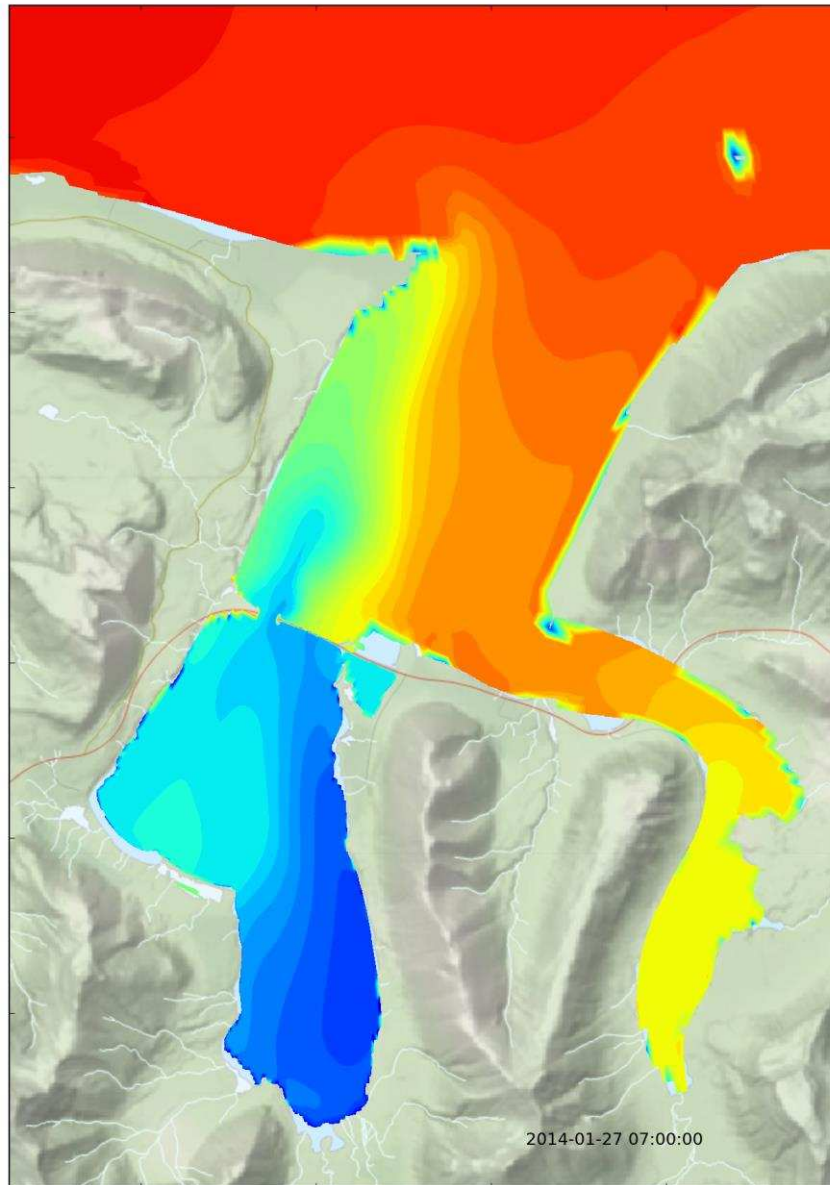
Mynd 69. Súrefnisstyrkur á L3n, lághleypi- og háhleypisíun (efri). Mæld sjávarhæð í H4 (neðri).



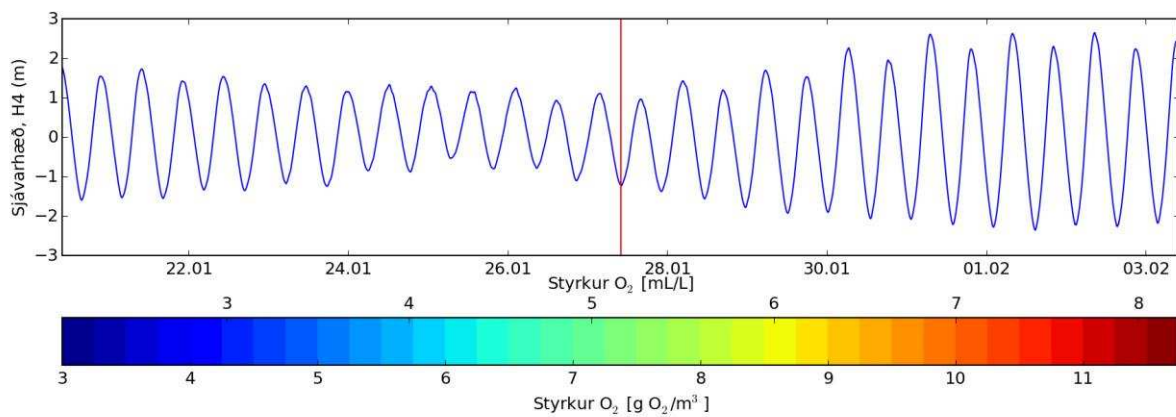
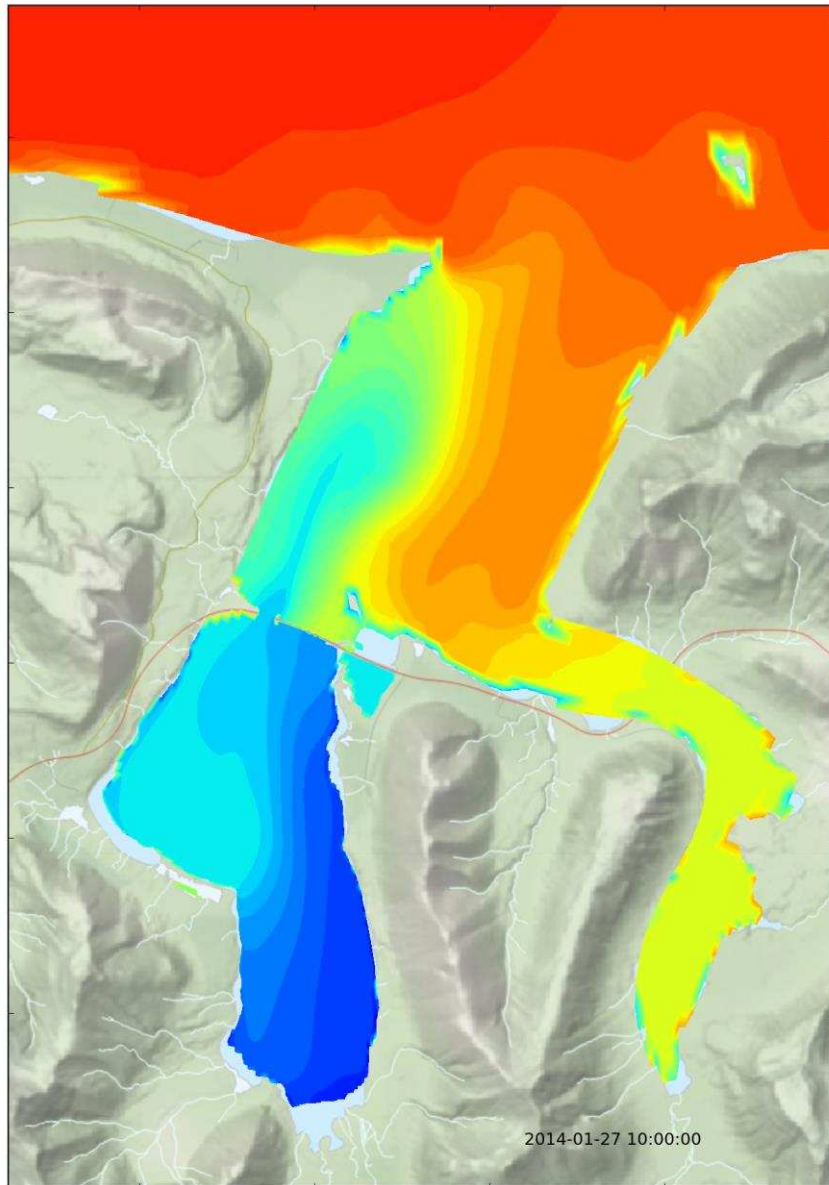
Mynd 70. Samanburður á mældum súrefnisstyrk mælitækja L1, L2 og L3.



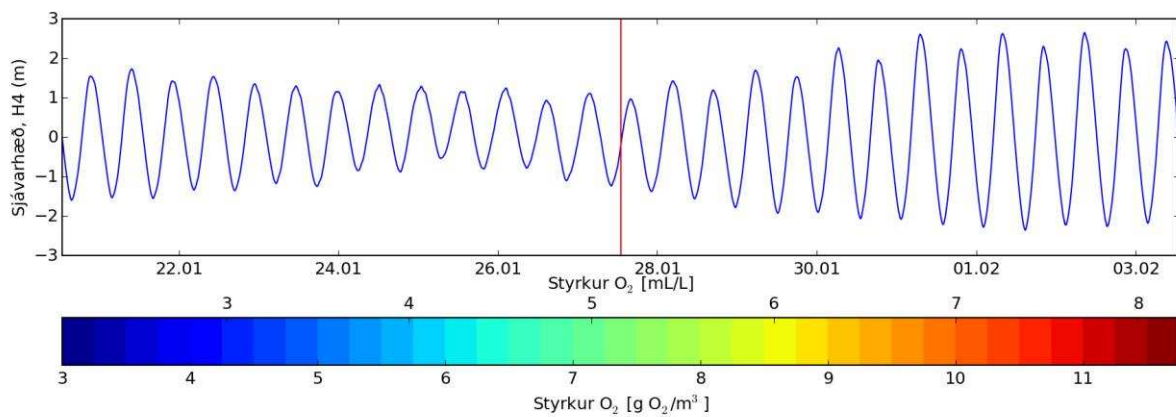
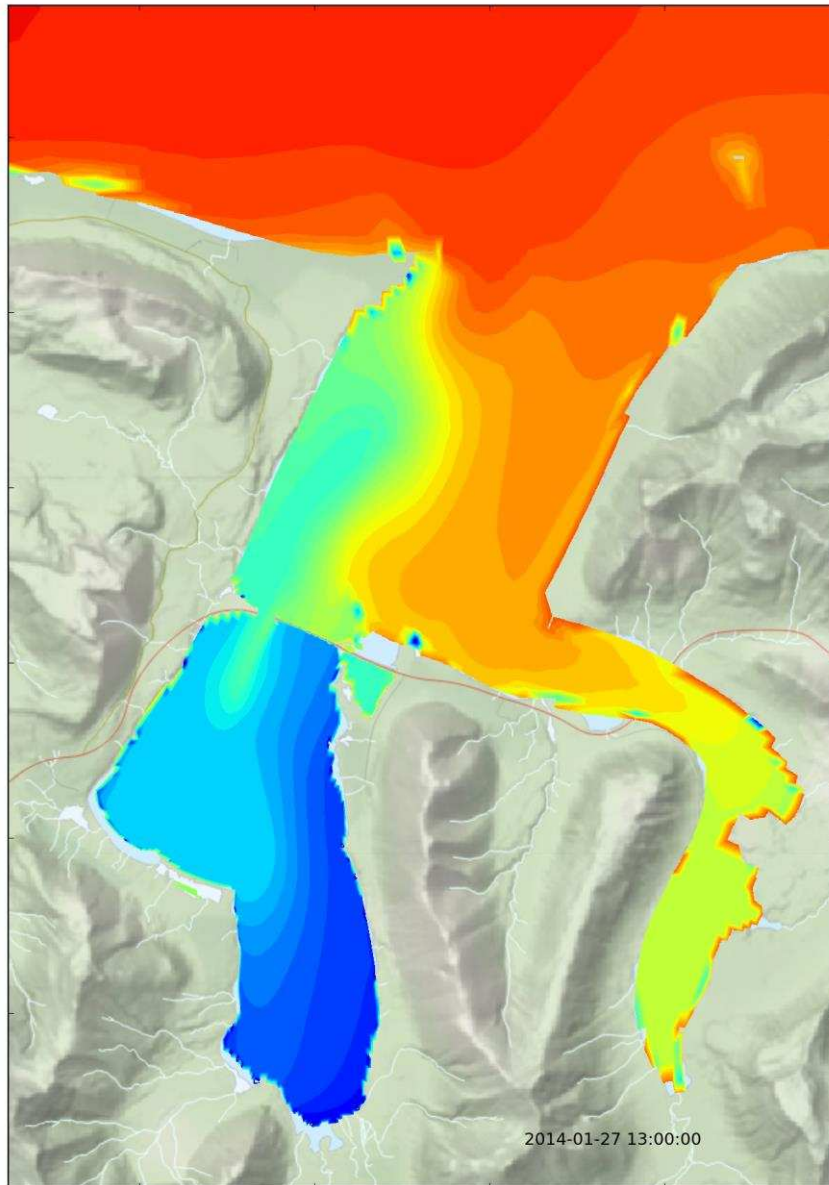
Mynd 71. Samanburður á lághleypisíuðum mælingum úr MicroCAT mælitækjum.



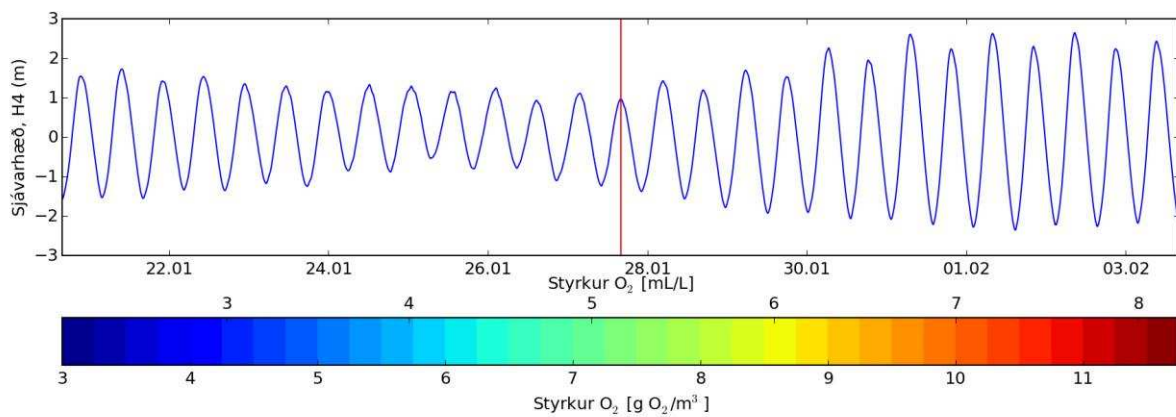
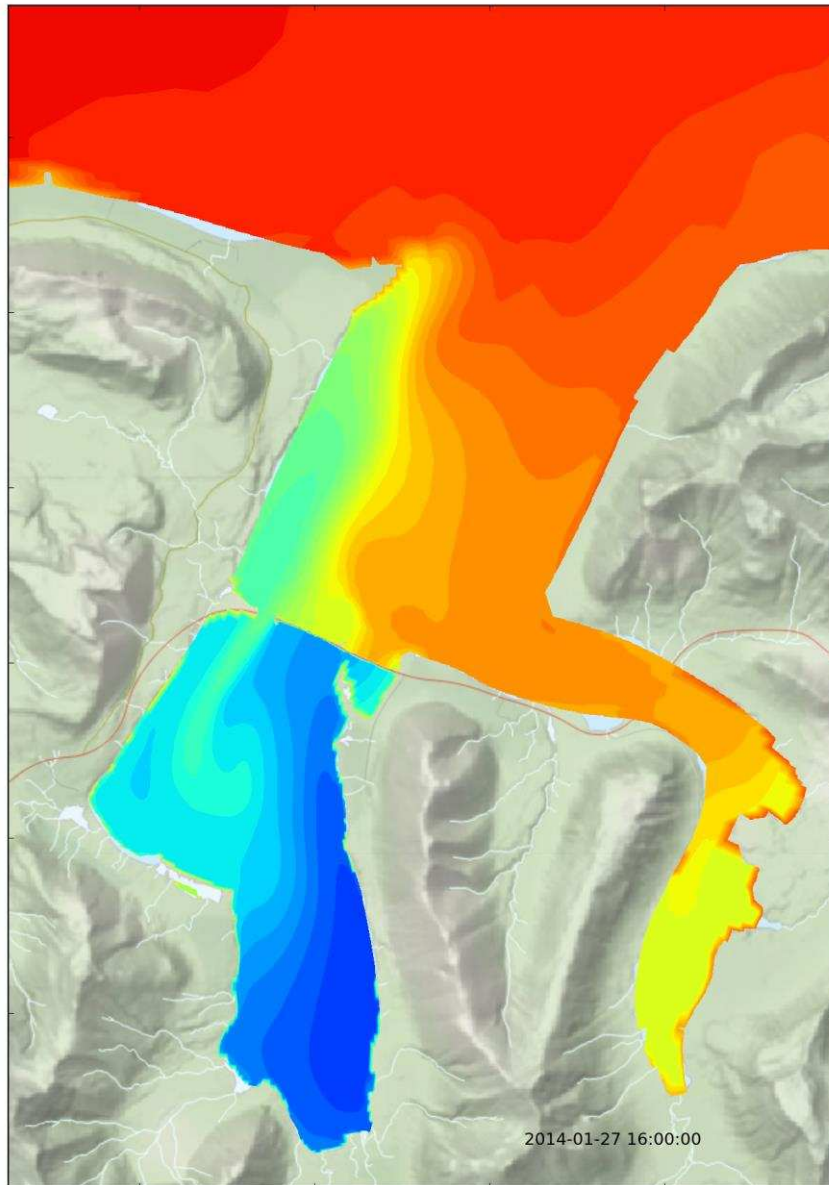
Mynd 72. Reiknaður súrefnisstyrkur á smástraumi nærri mældu lággildi á rannsóknartímabili, á útfalli.



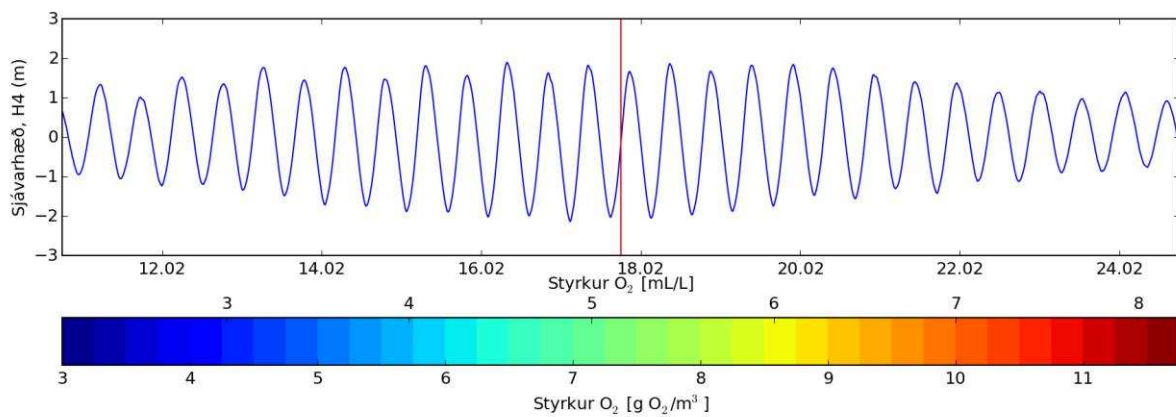
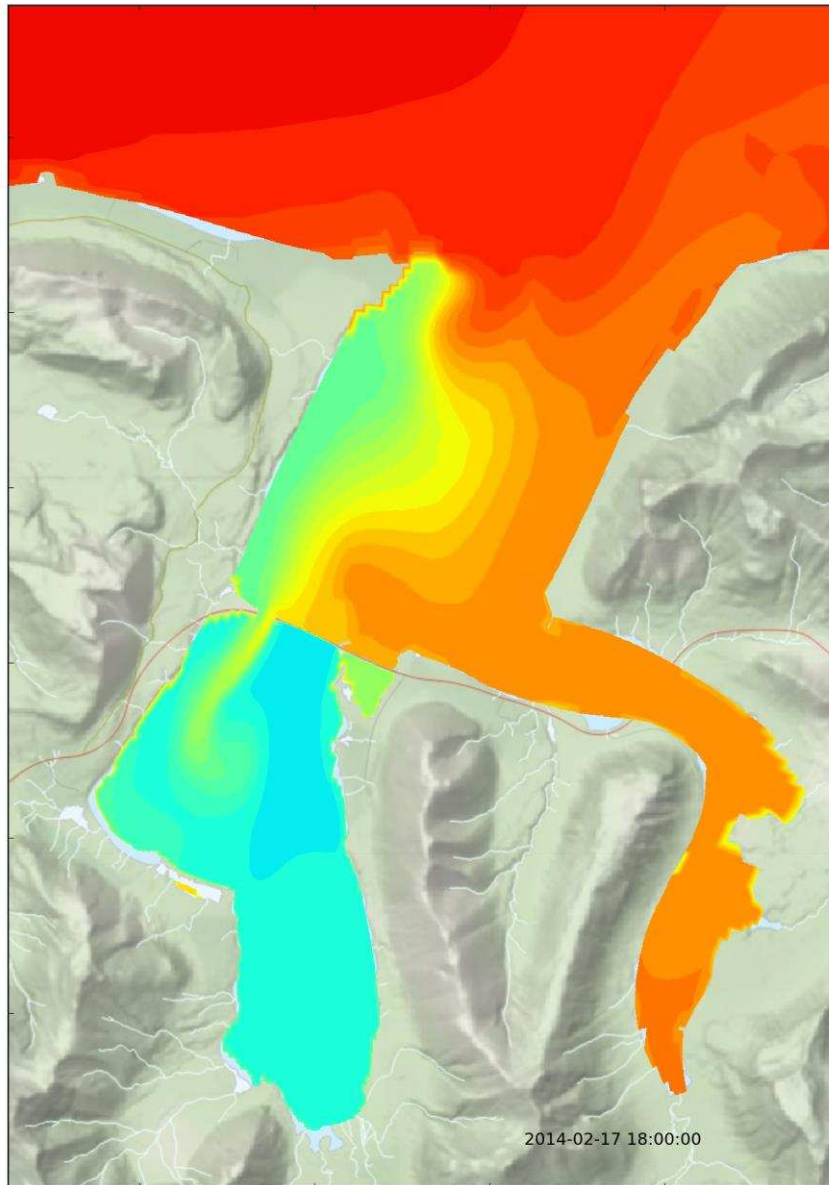
Mynd 73. Reiknaður súrefnisstyrkur á smástraumi nærri mældu lágildi á rannsóknartímabili, á liggjanda á fjöru.



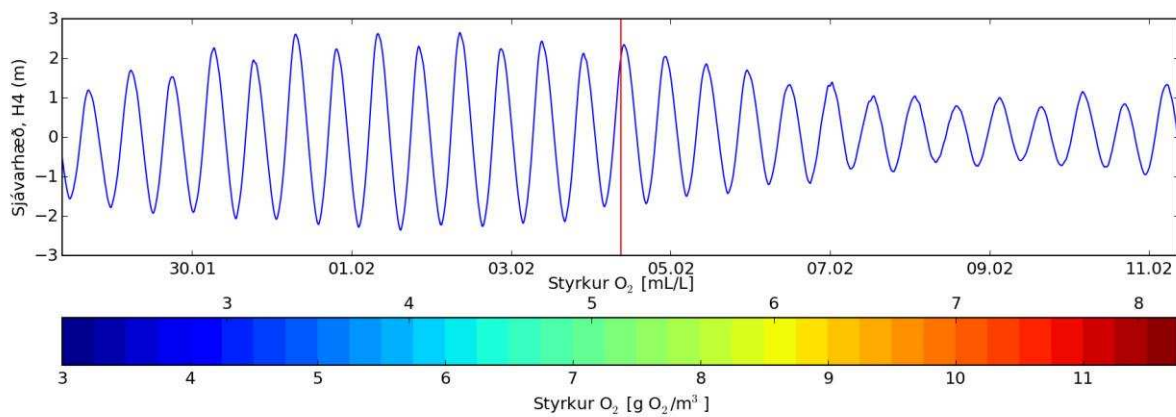
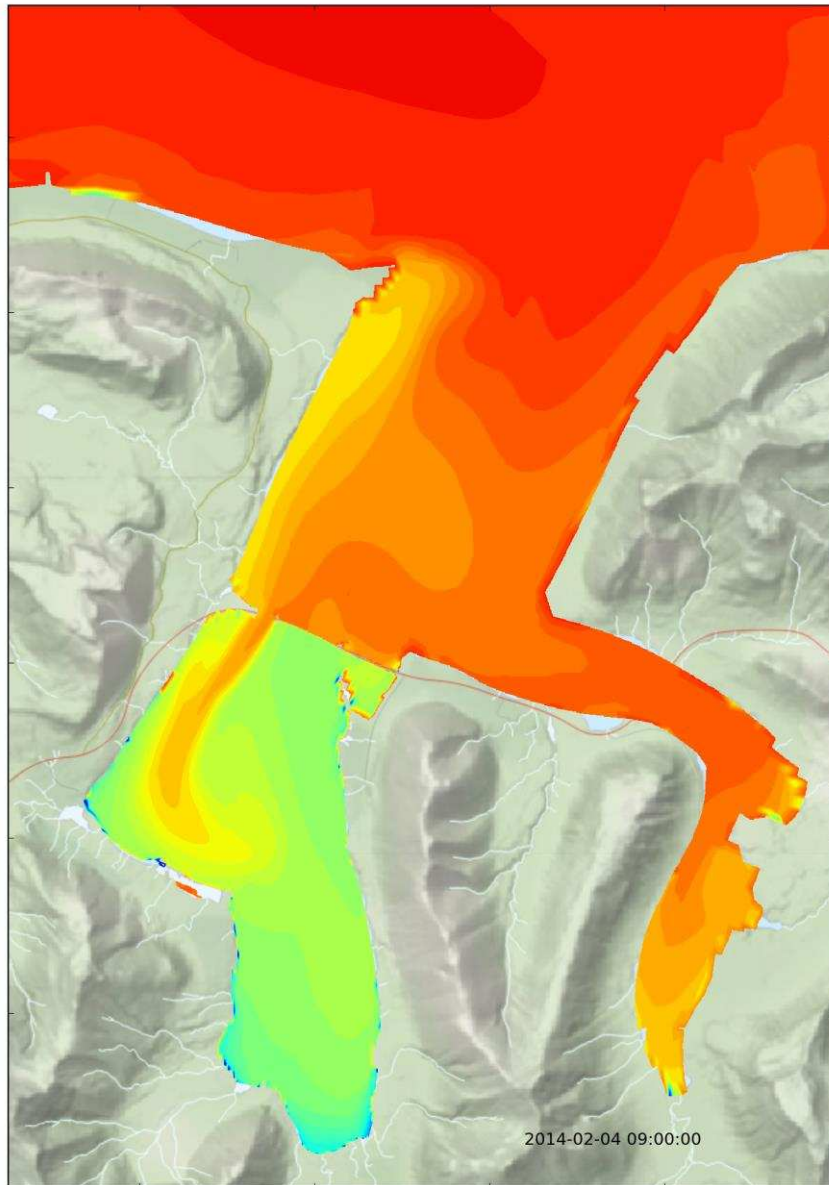
Mynd 74. Reiknaður súrefnisstyrkur á smástraumi nærri mældu lággi á rannsóknartímabili, á aðfalli.



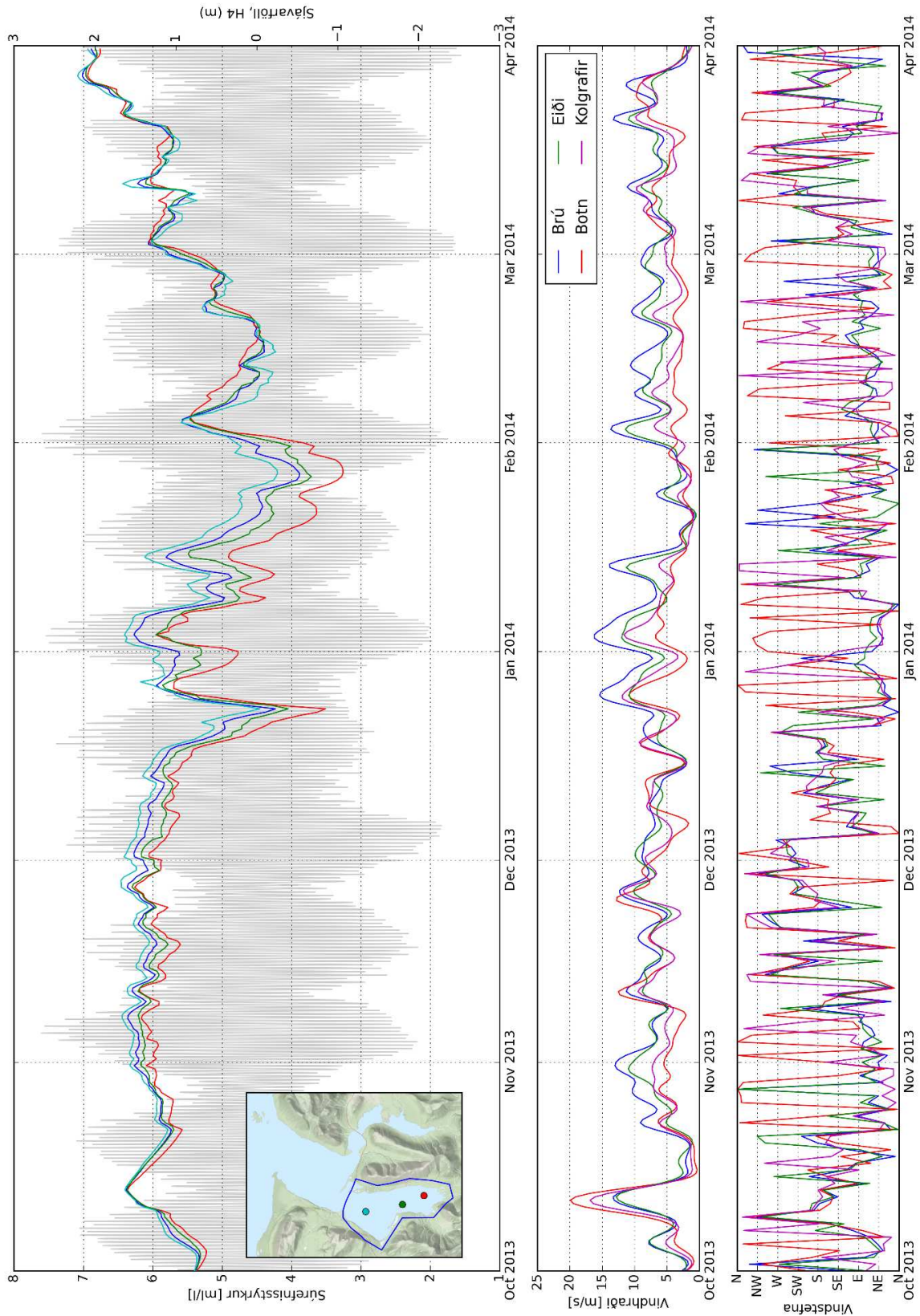
Mynd 75. Reiknaður súrefnisstyrkur á smástraumi nærri mældu lágildi á rannsóknartímabili, á liggjanda á flóði.



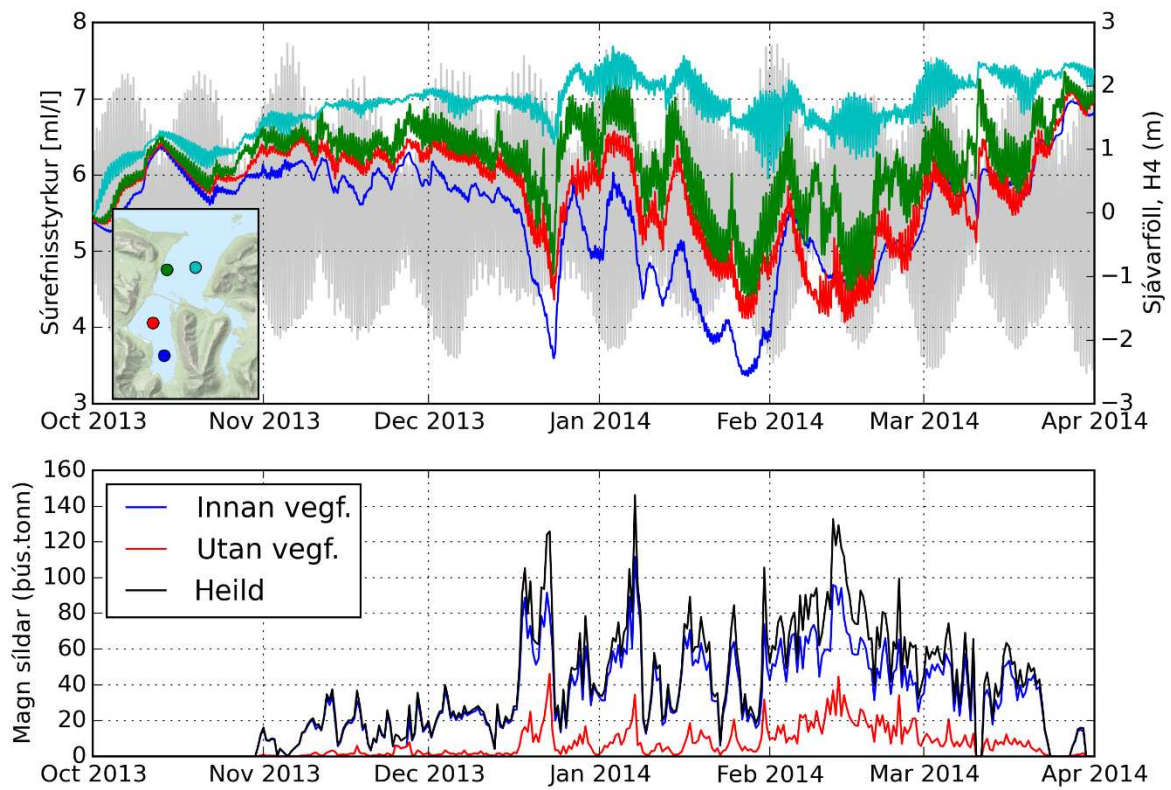
Mynd 76. Reiknaður súrefnisstyrkur á aðfalli á stórstraumi með tiltölulega stóru lágsúrefnissvæði í ytri firði.



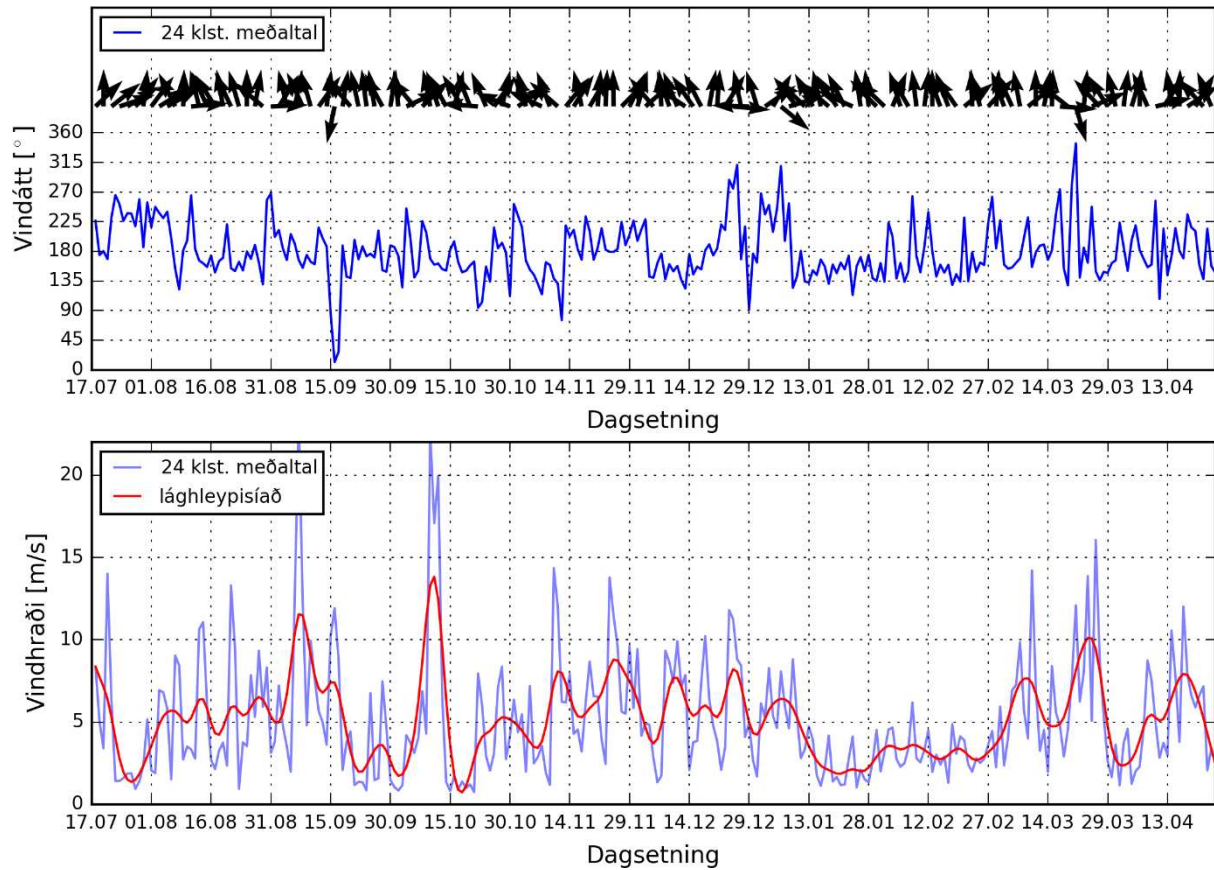
Mynd 77. Reiknaður súrefnisstyrkur á stórstraumi með mun minna lágsúrefnissvæði utan vegfyllingar.



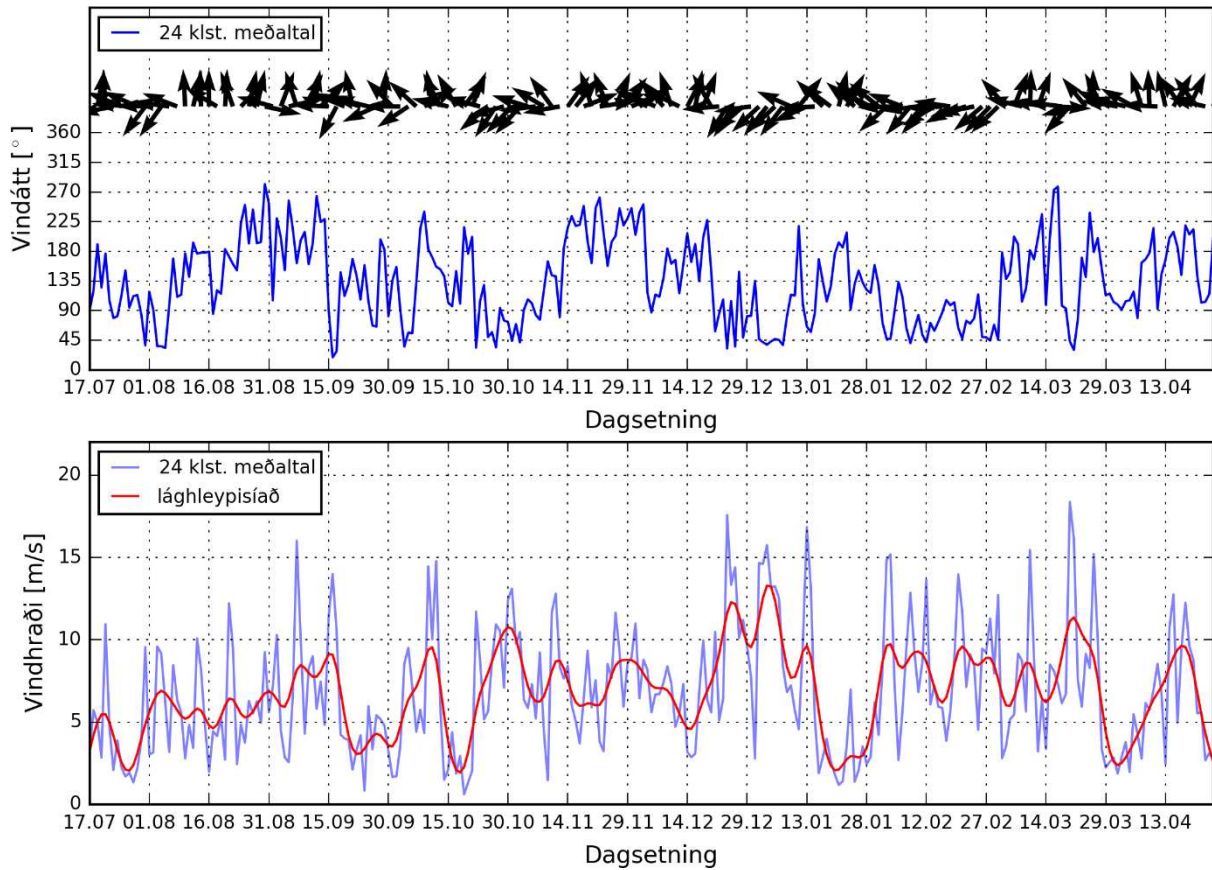
Mynd 78. Reiknaður meðalsúrefnisstyrkur (dökkblá lína) innan vegfyllingar Kolgrafafjarðar (svæði afmarkað á korti með svartri línu) ásamt reiknuðum styrk í þremur punktum. Einnig er sýndur mældur vindhraði (5 daga lághleypisíun), vindstefna (24 klst meðaltal) og sjávarhæð innan vegfyllingar.



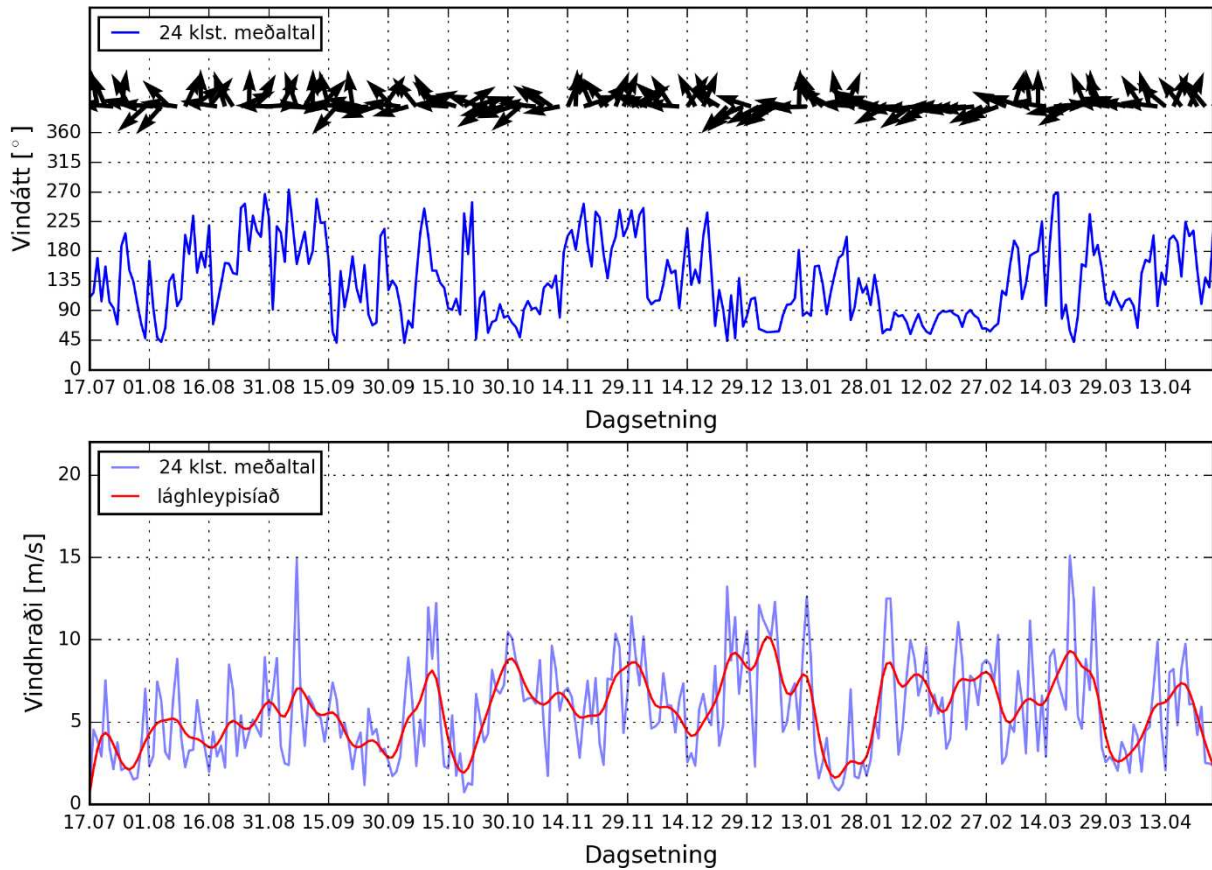
Mynd 79. Samanburður reiknaðs súrefnisstyrks á völdum stöðum utan og innan vegfyllingar í Kolgrafafirði (efri). Áætlað magn síldar í líkani út frá aðlögun vatnsgæðalíkans (neðri).



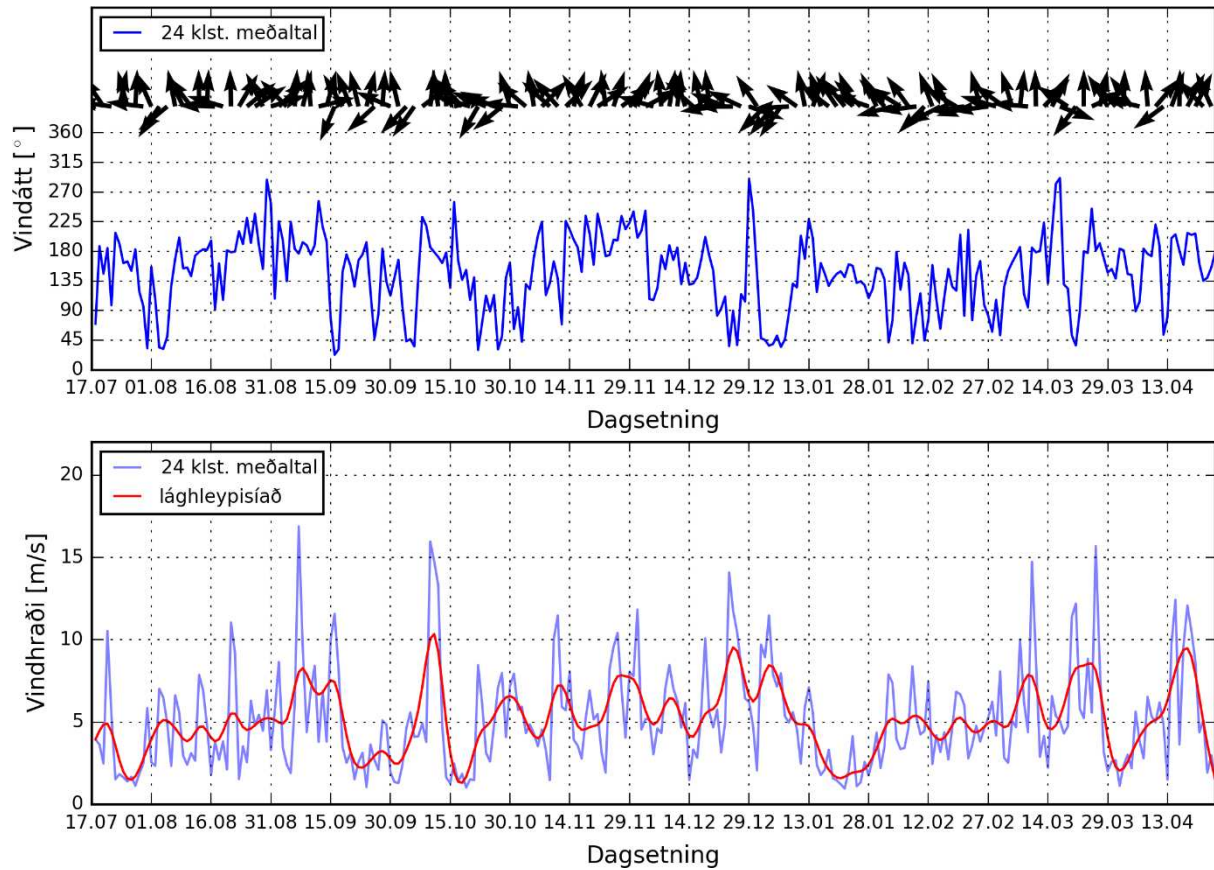
Mynd 80. Veðurstöð í botni Kolgrafafjarðar. Mæld vindátt (efri) og vindhraði (neðri). Júlí 2013 – apríl 2014.



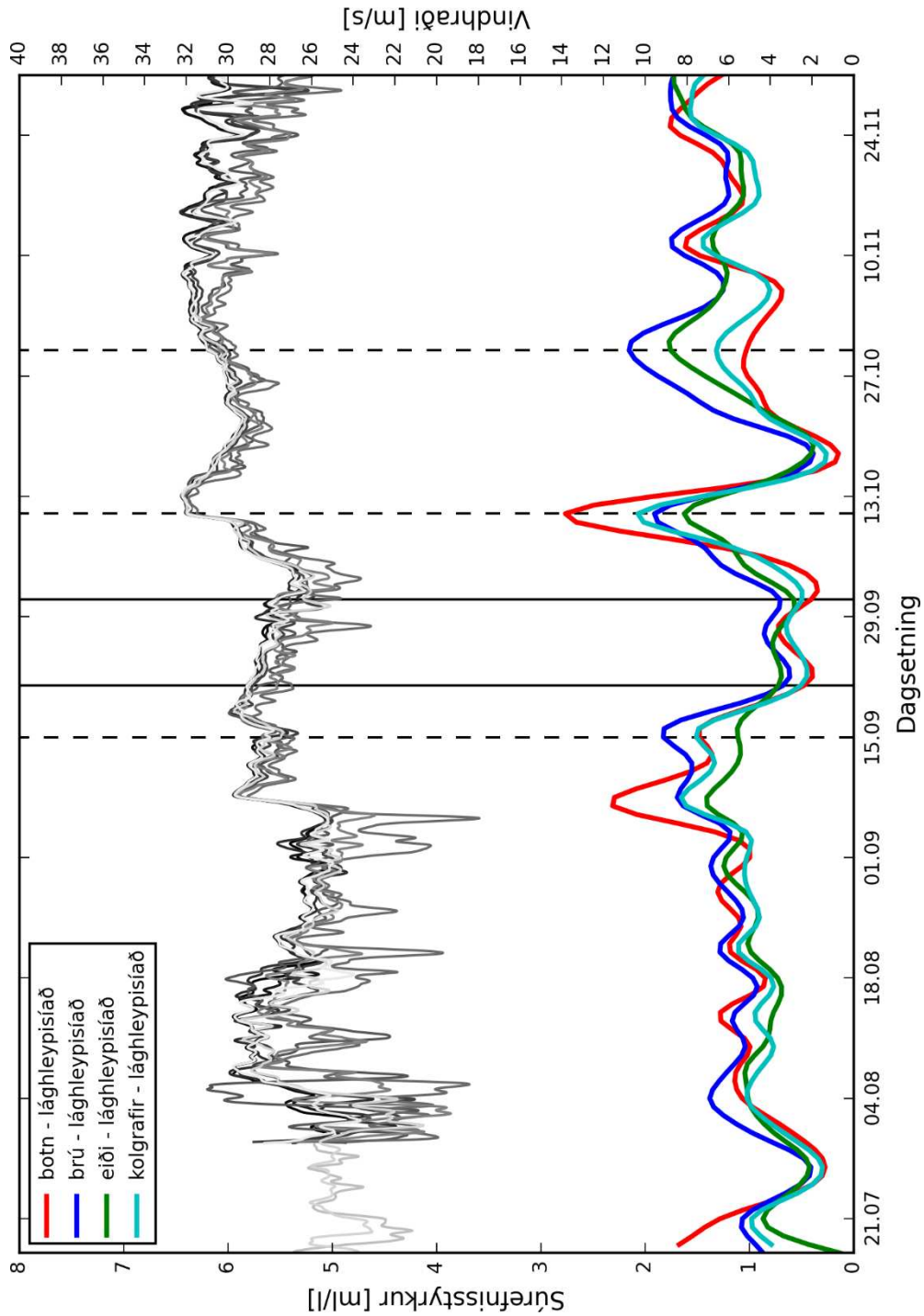
Mynd 81. Veðurstöð á brúnni í Kolgrafafirði. Mæld vindátt (efri) og vindhraði (neðri). Júlí 2013 – apríl 2014.



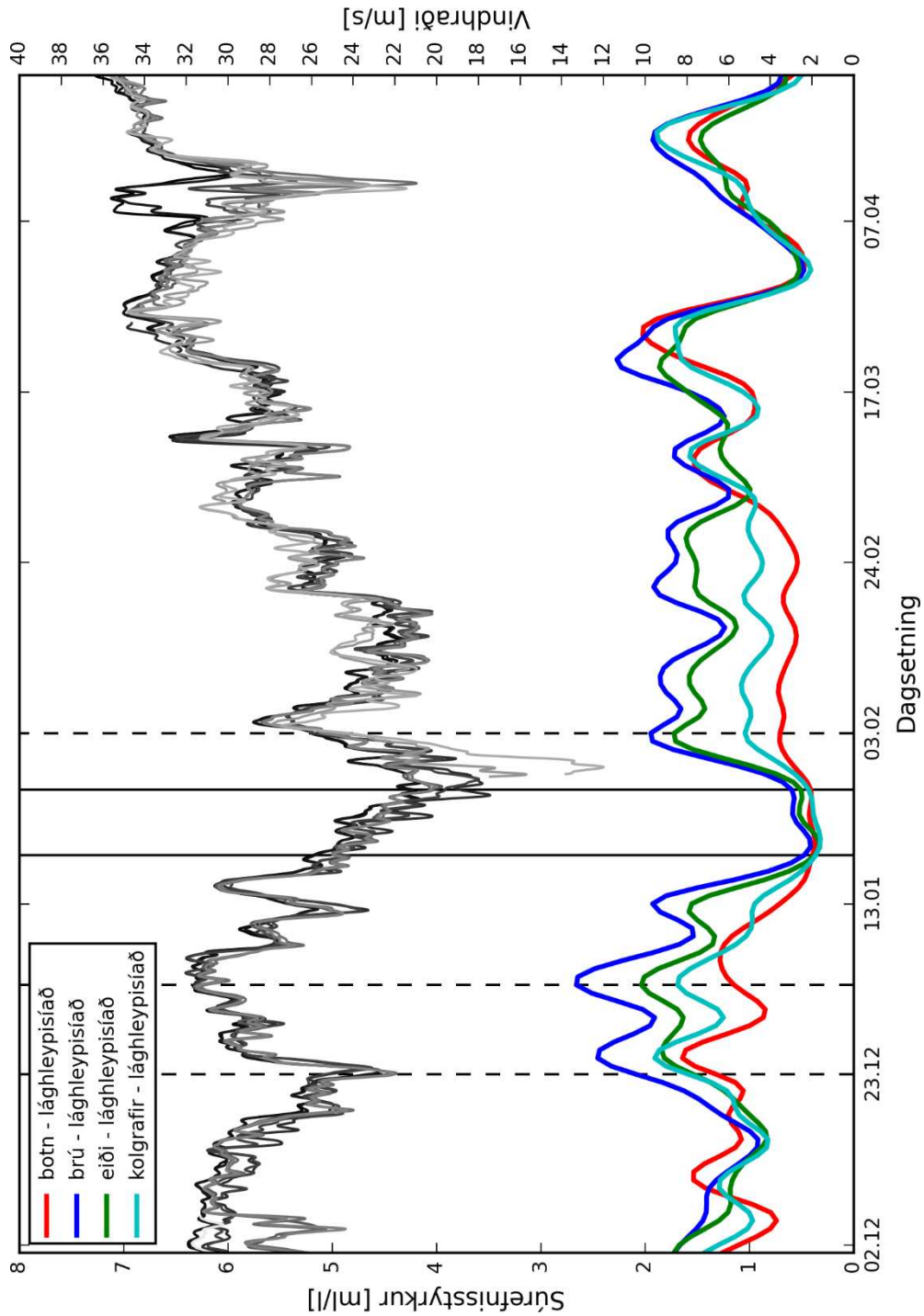
Mynd 82. Veðurstöð við Eiði í Kolgrafafirði. Mæld vindátt (efri) og vindhraði (neðri). Júlí 2013 – apríl 2014.



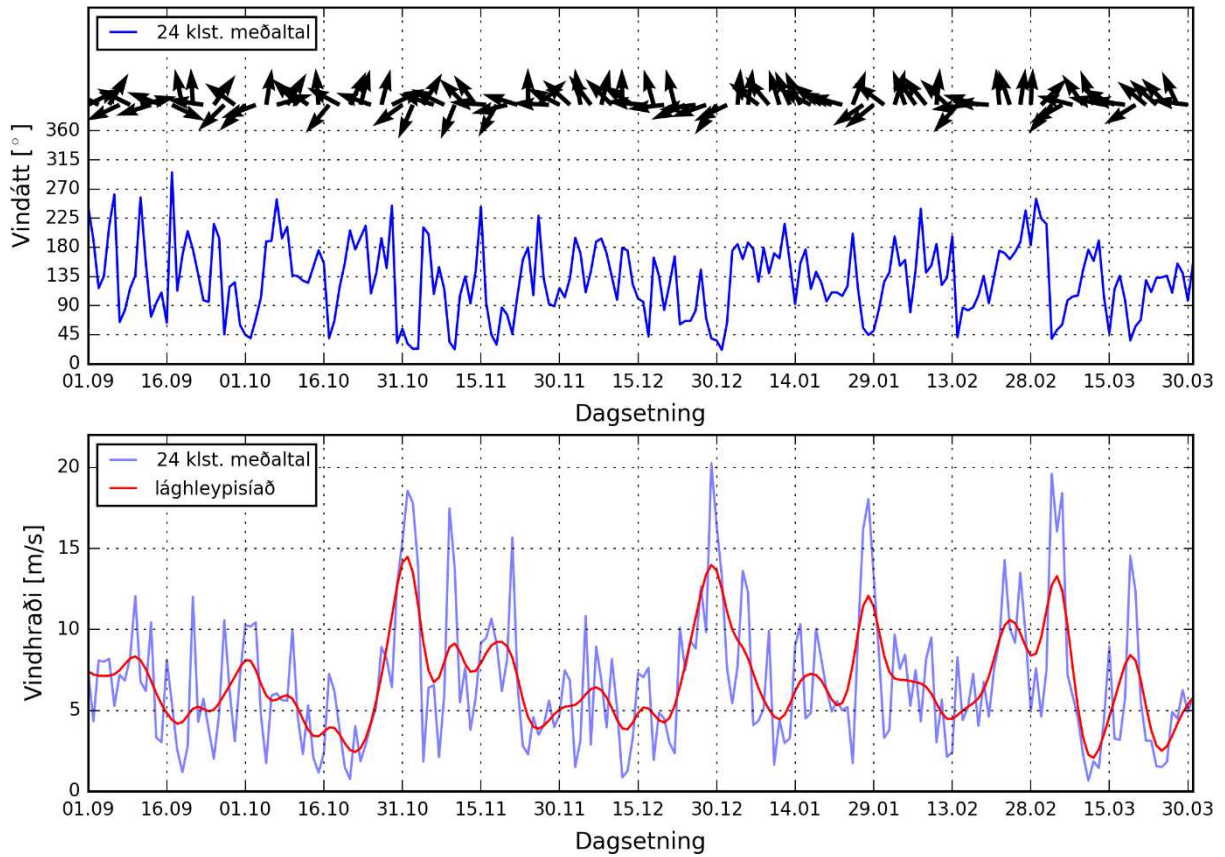
Mynd 83. Veðurstöð við Kolgrafir. Mæld vindátt (efri) og vindhraði (neðri). Júlí 2013 – apríl 2014.



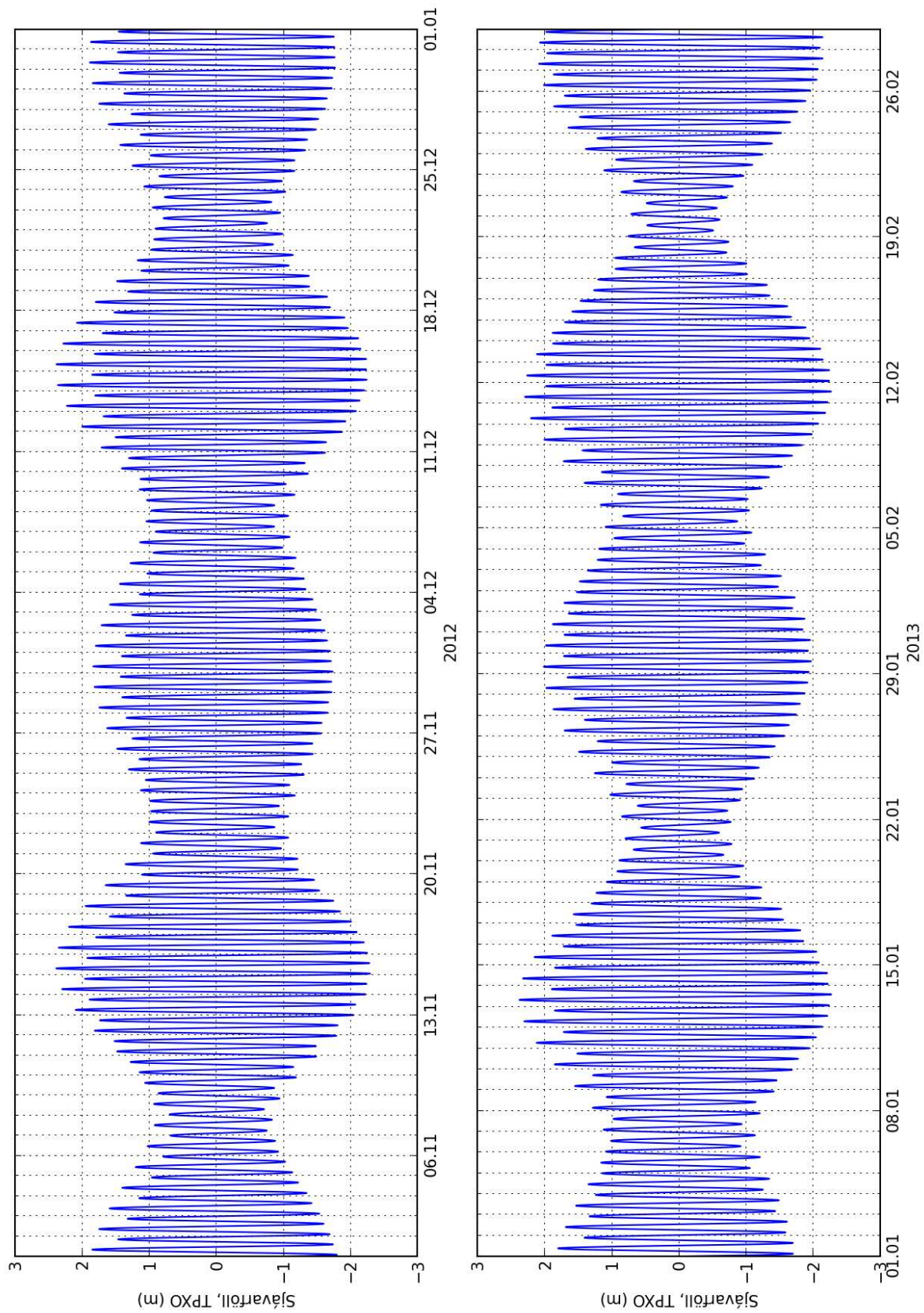
Mynd 84. Lágheypisíaðar (28 klst) súrefnismælingar úr MicroCAT (gráu línur) og lágheypisíaðar (10 daga) vindmælingar í Kolgrafafirði. Júlí 2013 – nóvember 2013.



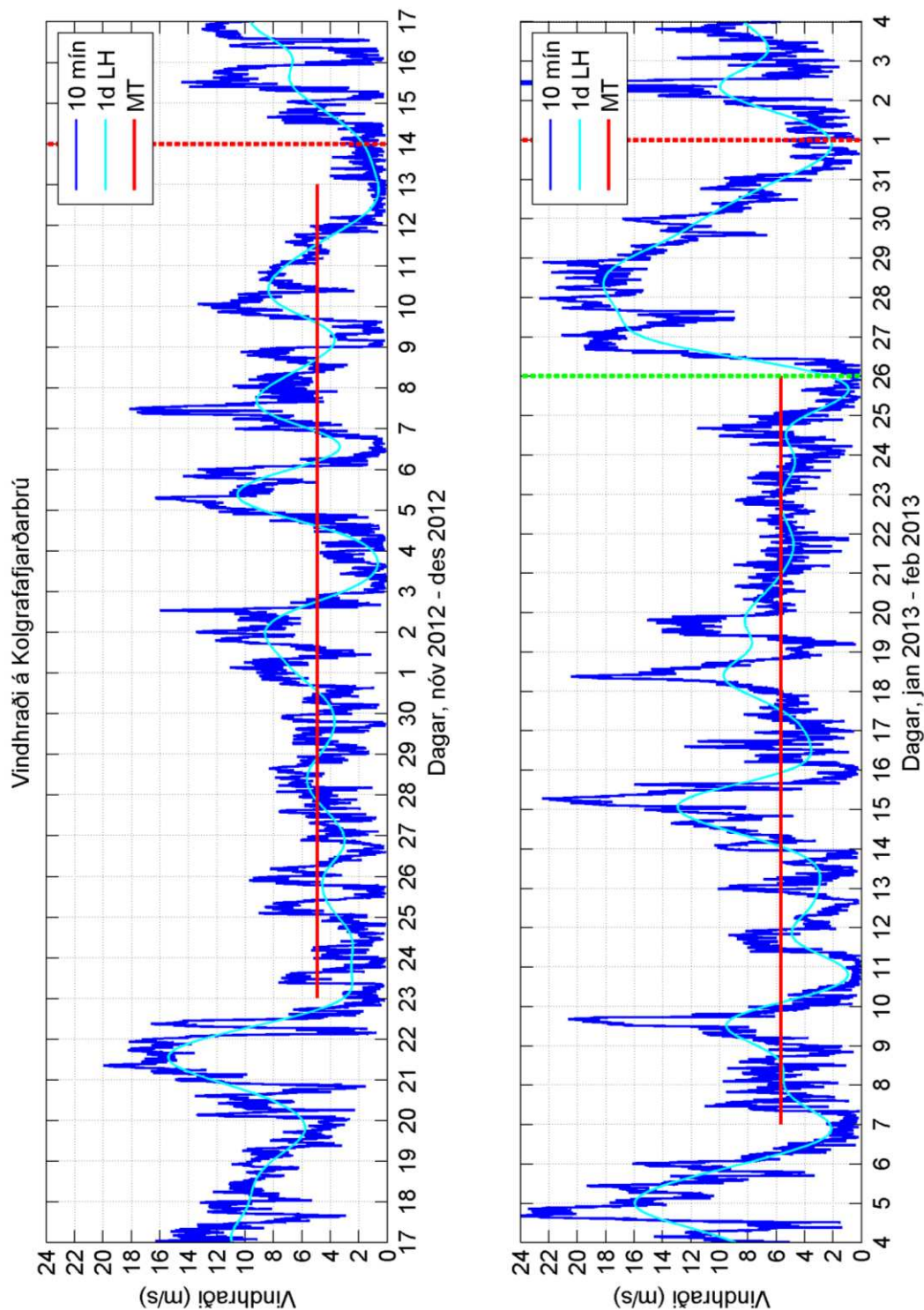
Mynd 85. Lághleypisíaðar (28 klst) súrefnismælingar úr MicroCAT (gráu línur) og lághleypisíaðar (10 daga) vindmælingar í Kolgrafafirði. Desember 2013 – apríl 2014.



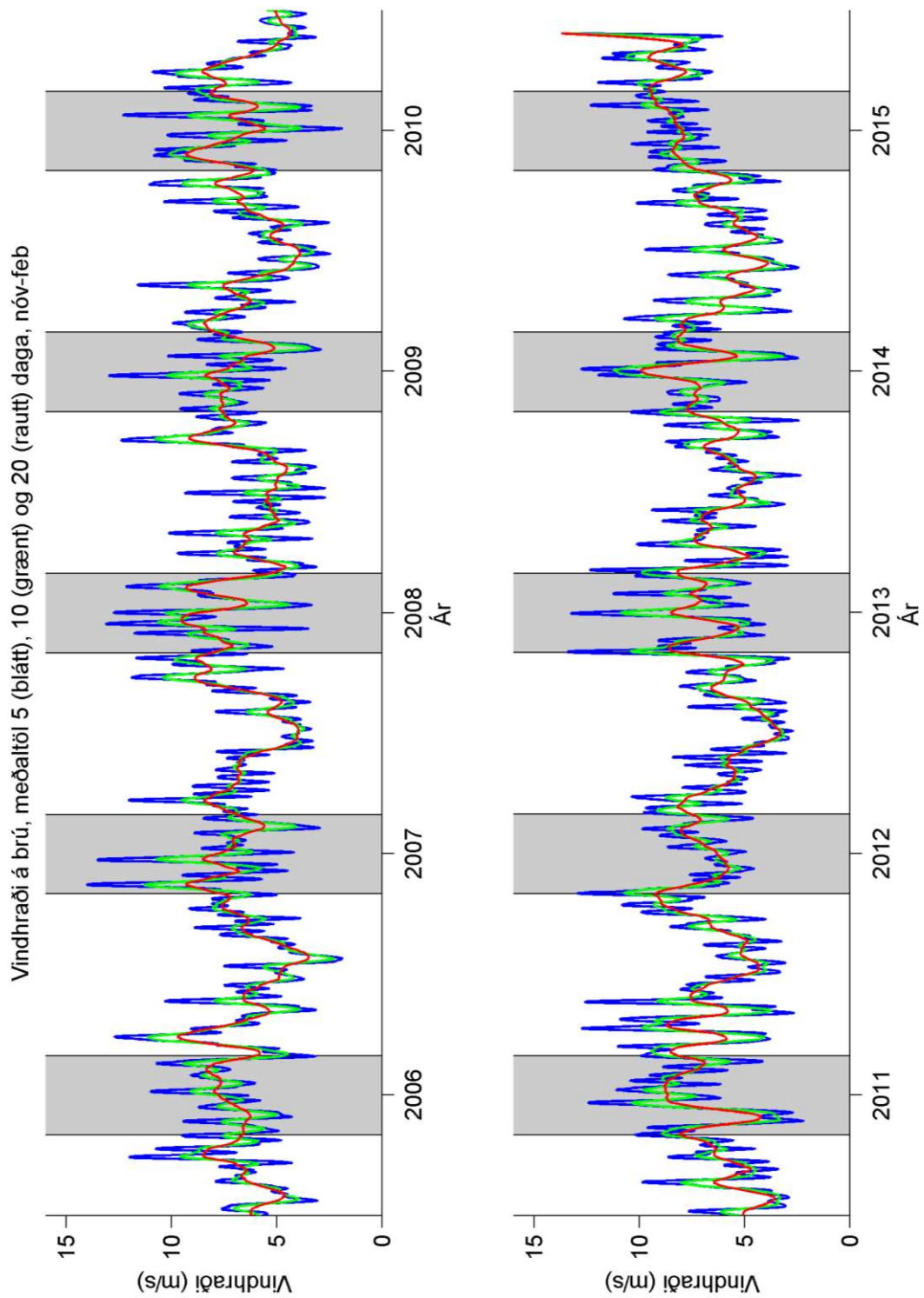
Mynd 86. Veðurstöð á brúnni í Kolgrafafirði. Mæld vinddætt (efri) og vindhraði (neðri). Vetur 2012-2013.



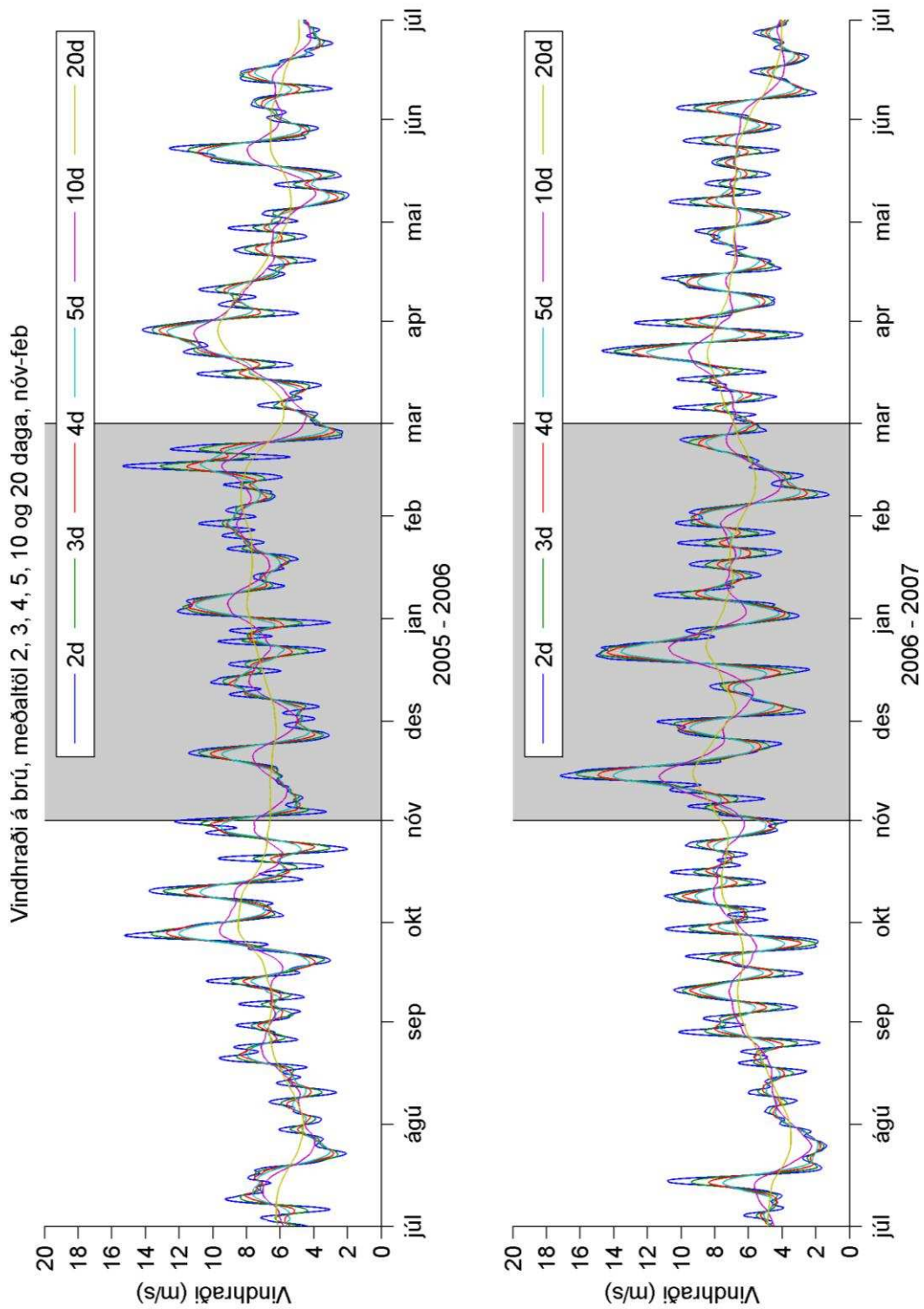
Mynd 87. Áætluð sjávarhæð í innri firði fyrir nóvember 2012 til loka febrúar 2013, frá hnattræna sjávarfallalíkaninu TPXO.



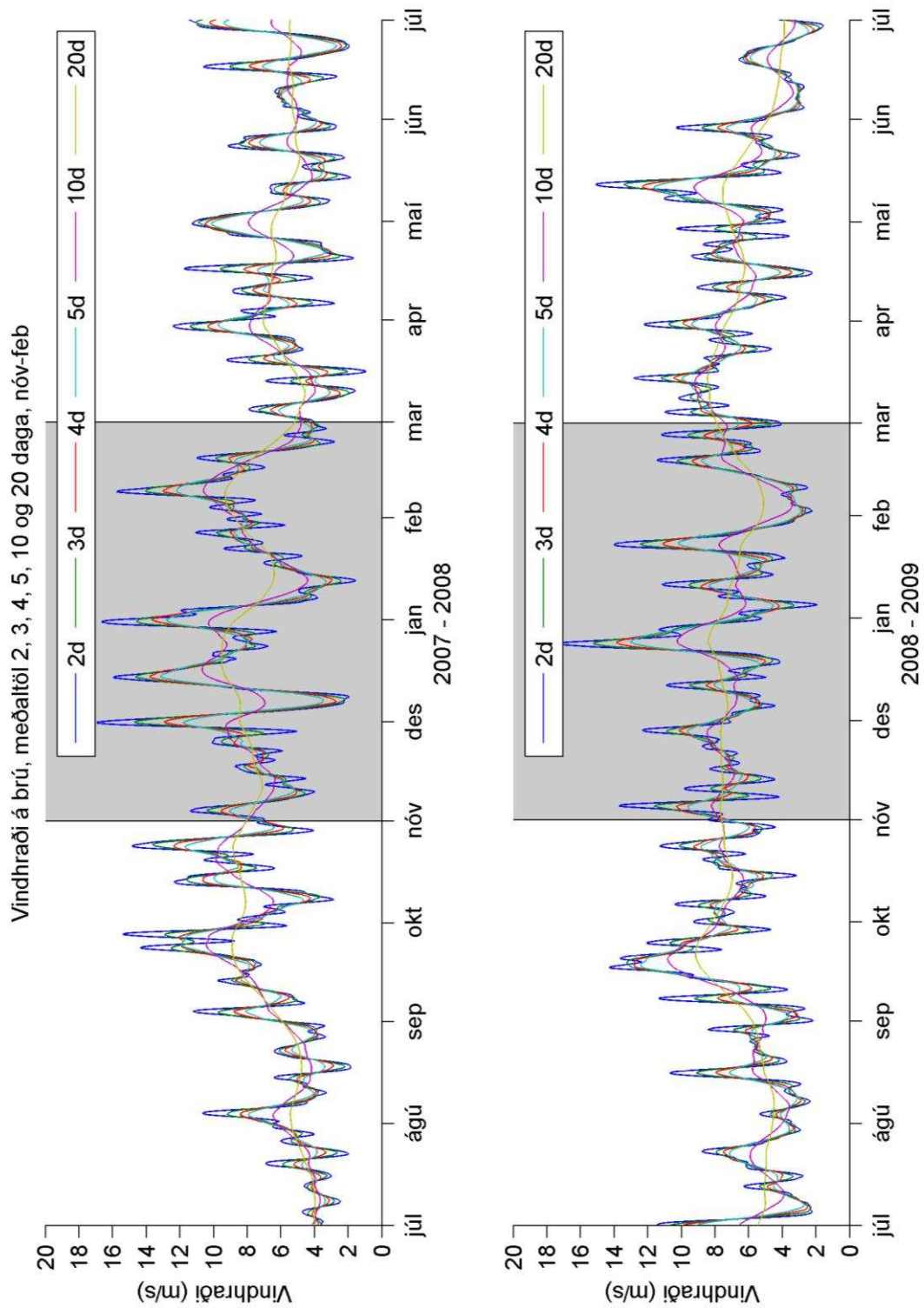
Mynd 88. Mældur vindhraði á Kolgrafafjarðarbrú vetur 2012-2013 þegar síldardauði varð. Sýndar er 10 mínútna mælingar, eins dags lágþleypisáðar mælingar (1dLH) og meðaltöl (MT) um 20 daga samfelldra tímabila í aðdraganda síldardauðanna. Rauðar punktalínur markar þá daga þegar síldardauða varð vart, græn punktalína markar tímapiunkt í aðdraganda seinni atburðar sem hefur sams konar vindafarstímabil að baki og þegar fyrri atburðurinn varð.



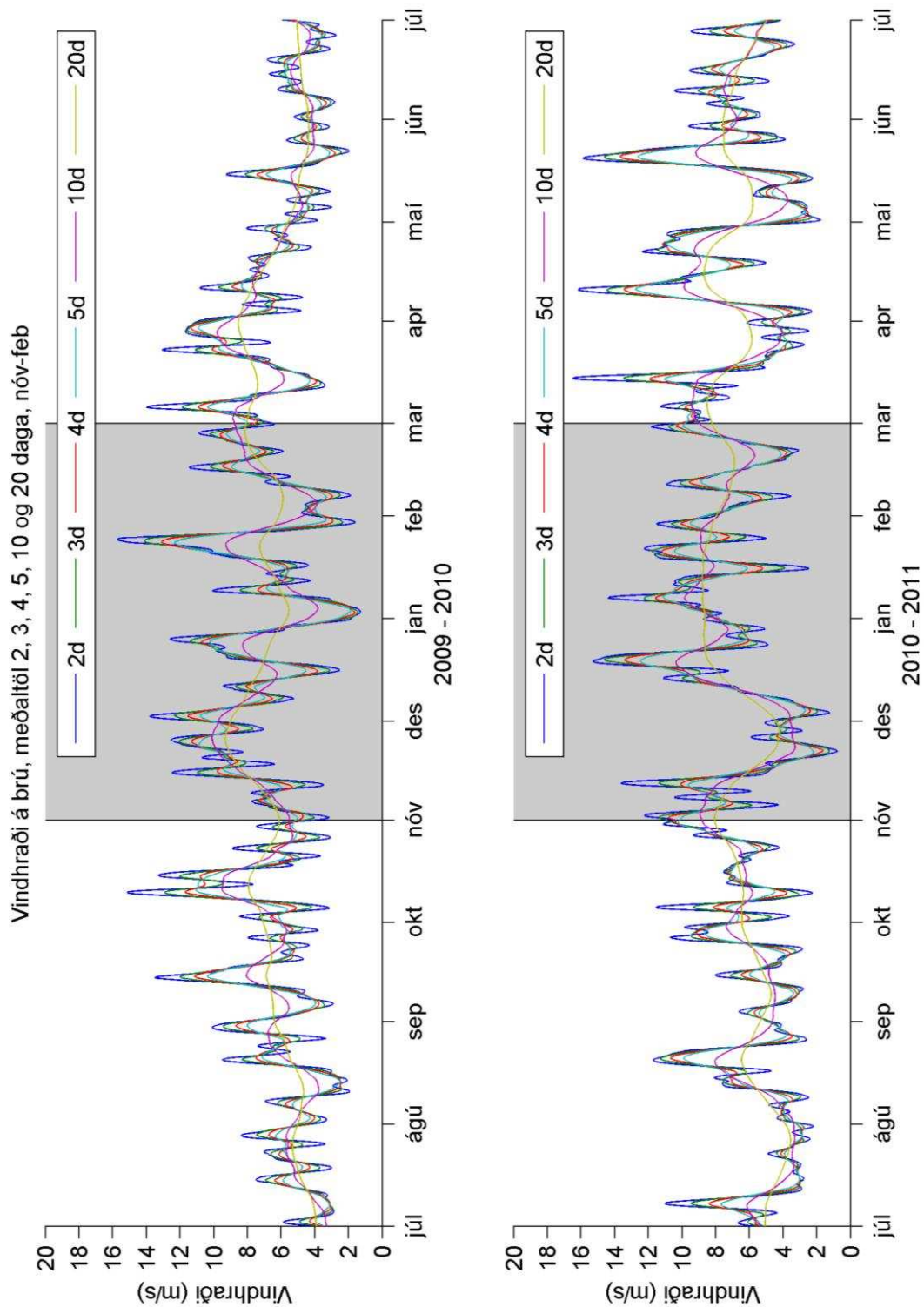
Mynd 89. Meðaltal vindhraða á brú, yfir 5, 10 og 20 daga, með viðmiðunartímabil nóvember til og með febrúar skyggt með gráum lit. Merking árs á x-ás miðar við byrjun árs, 1. janúar.



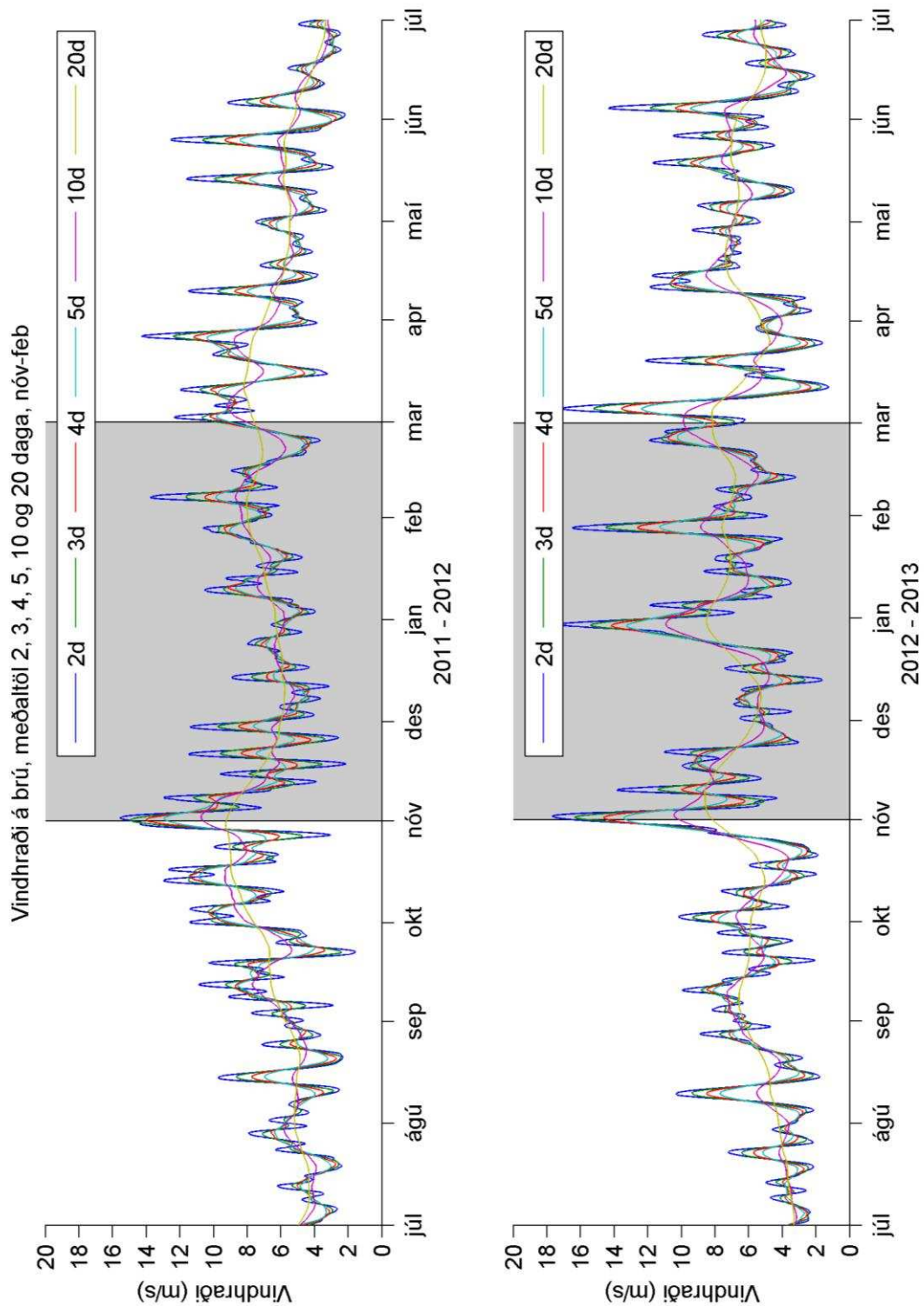
Mynd 90. Meðaltal vindhraða á brú, yfir 2, 3, 4, 5, 10 og 20 daga, með viðmiðunartímabil nóvember til og með febrúar skyggt með gráum lit. Júlí 2005 – júlí 2006, og júlí 2006 – júlí 2007.



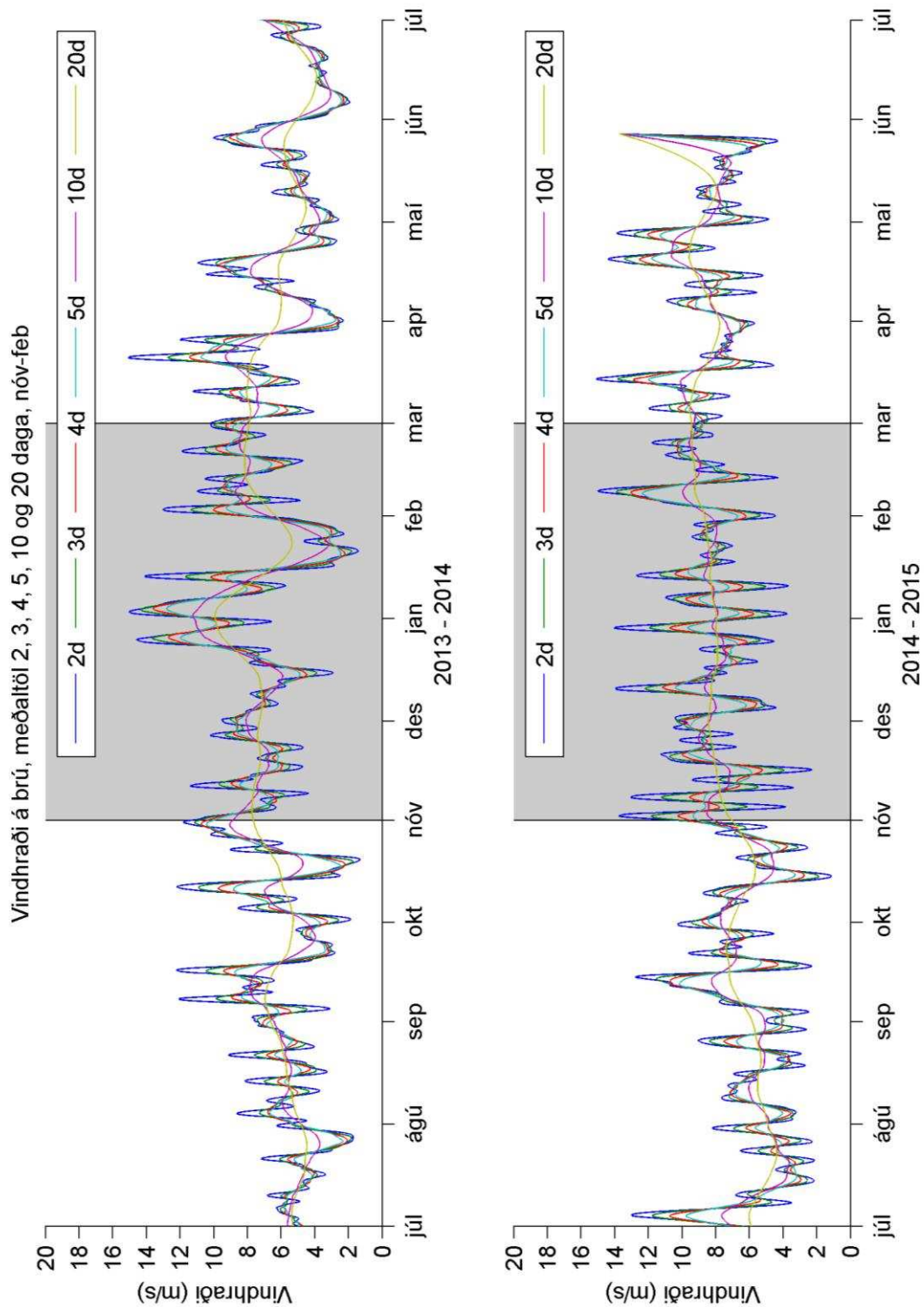
Mynd 91. Meðaltal vindhraða á brú, yfir 2, 3, 4, 5, 10 og 20 daga, með viðmiðunartímabil nóvember til og með febrúar skyggt með gráum lit. Júlí 2007 – júlí 2008, og júlí 2008 – júlí 2009.



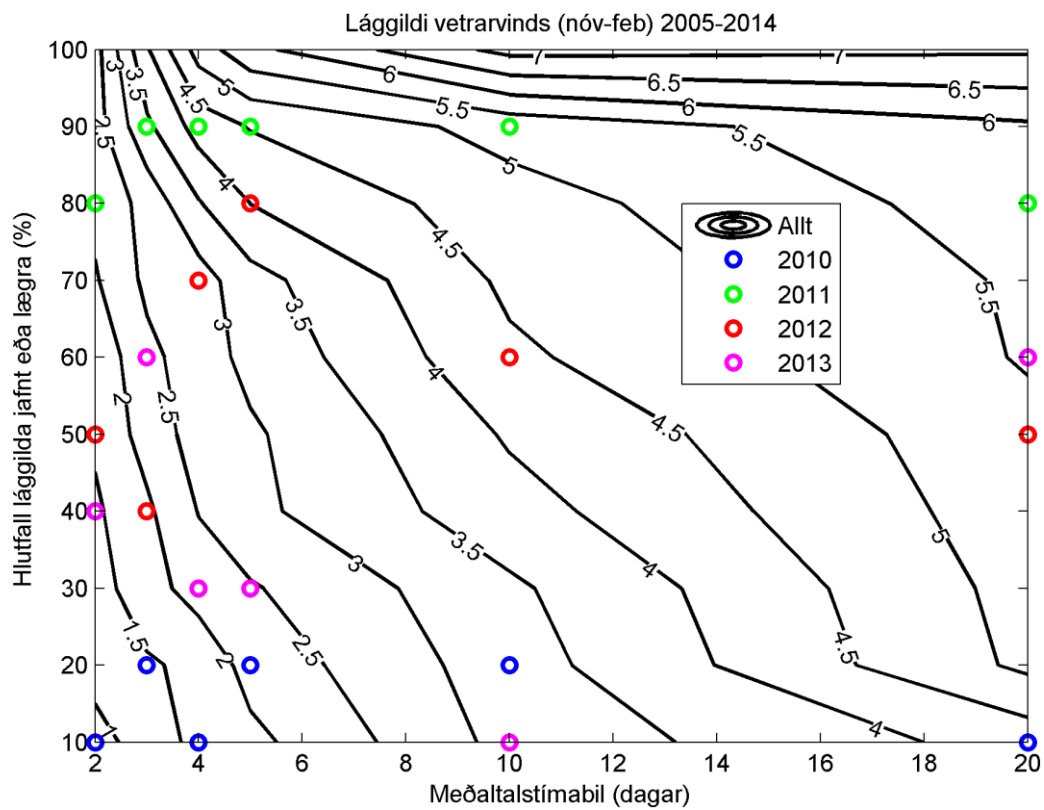
Mynd 92. Meðaltal vindhraða á brú, yfir 2, 3, 4, 5, 10 og 20 daga, með viðmiðunartímabil nóvember til og með febrúar skyggt með gráum lit. Júlí 2009 – júlí 2010, og júlí 2010 – júlí 2011.



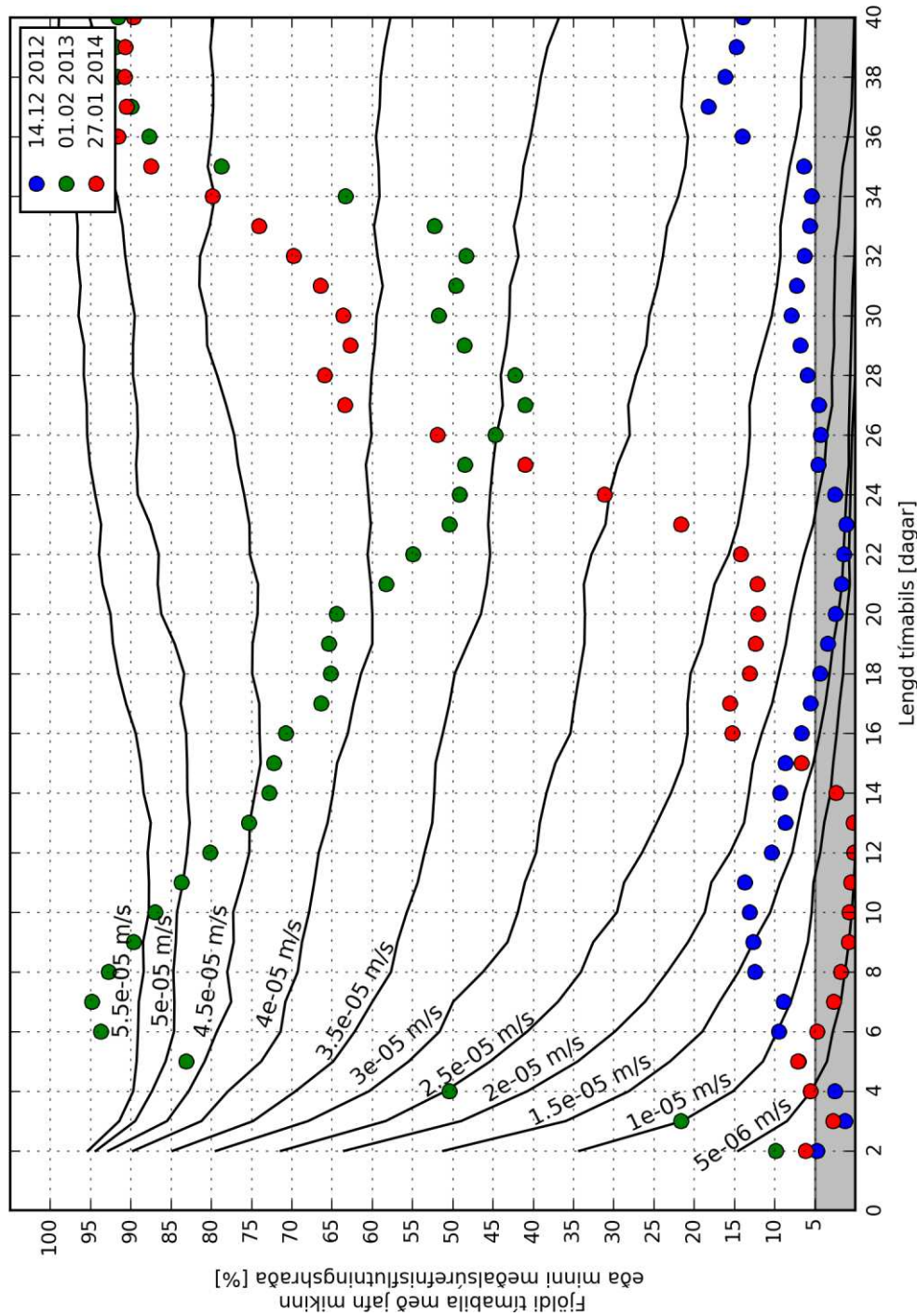
Mynd 93. Meðaltal vindhraða á brú, yfir 2, 3, 4, 5, 10 og 20 daga, með viðmiðunartímabil nóvember til og með febrúar skyggt með gráum lit. Júlí 2011 – júlí 2012, og júlí 2012 – júlí 2013.



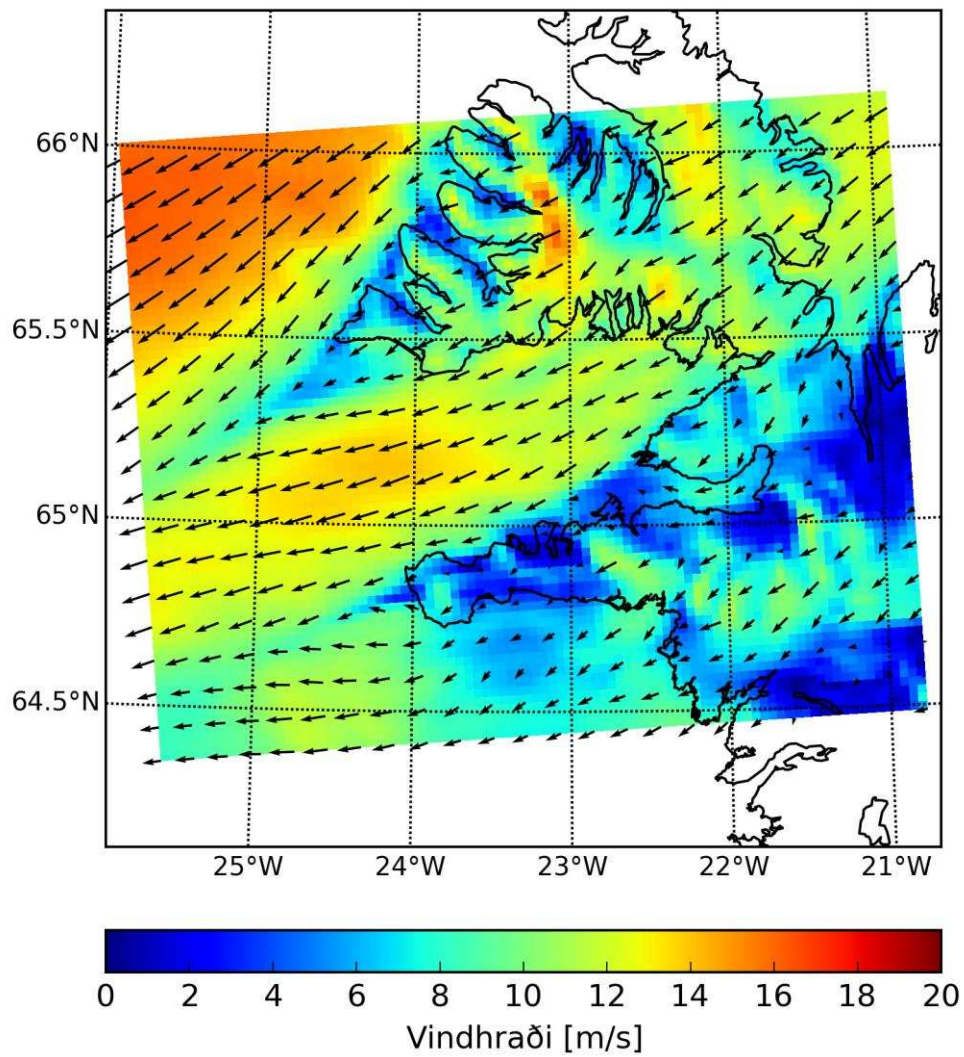
Mynd 94. Meðaltal vindhraða á brú, yfir 2, 3, 4, 5, 10 og 20 daga, með viðmiðunartímabil nóvember til og með febrúar skyggt með gráum lit. Júlí 2013 – júlí 2014, og júlí 2014 – júlí 2015.



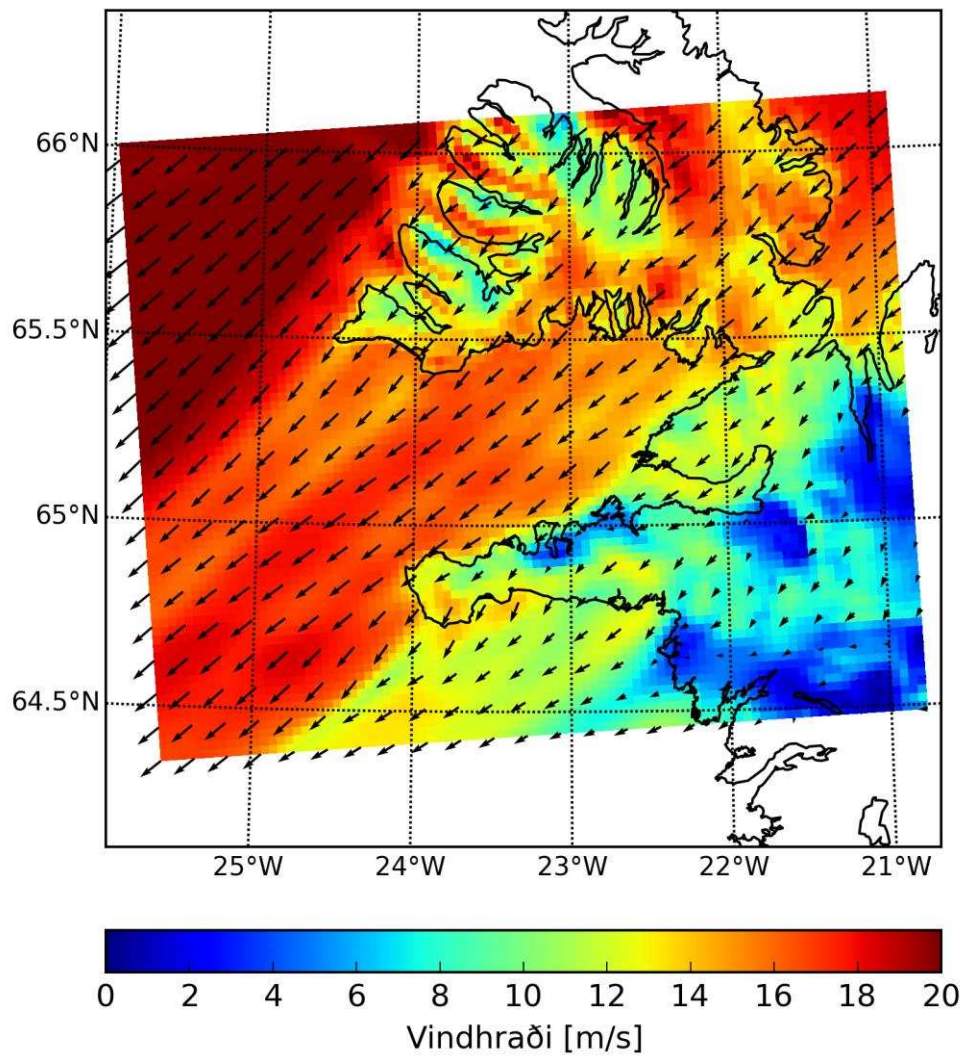
Mynd 95. Lággildi vetrarvinds hvers vetrar 2005/2006 til 2014/2015 yfir meðalöl 2, 3, 4, 5, 10 og 20 daga brúað á meðaltalstímabil og fært á hlutfallsgrunn þar sem fjöldi lággilda jafnt eða minna en viðmiðunargildi.



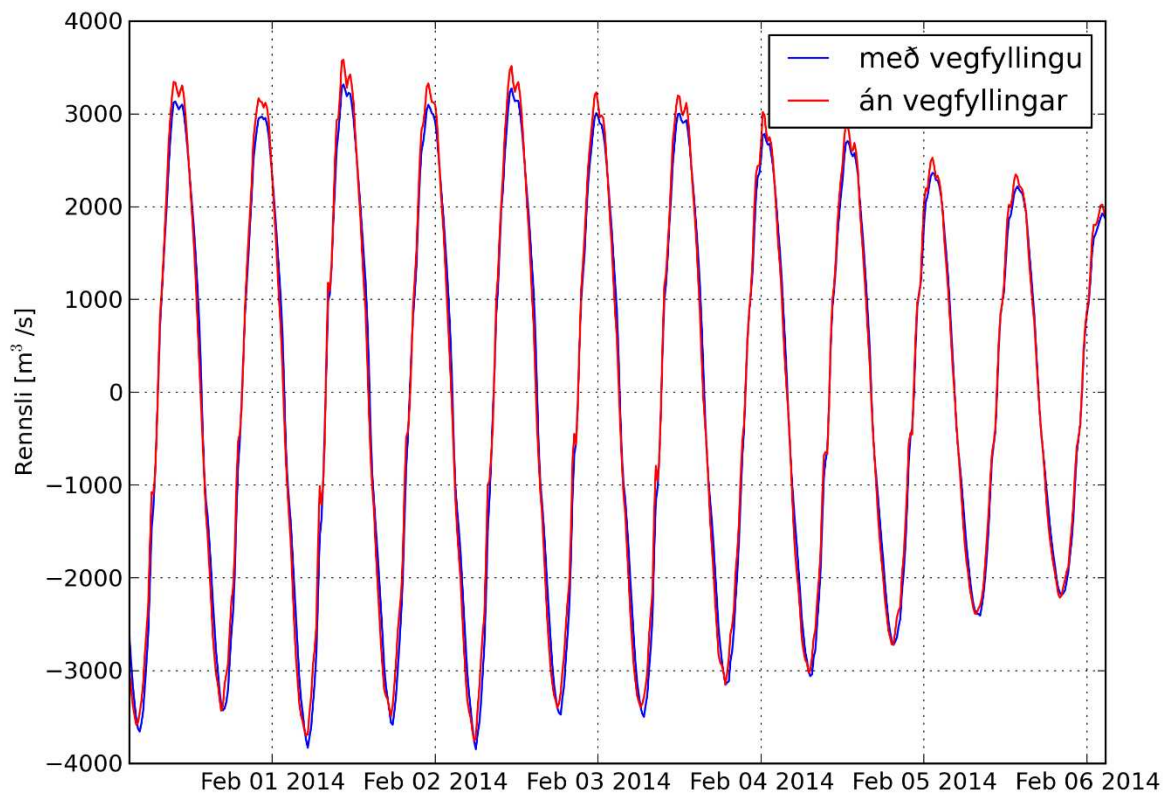
Mynd 96. Reiknaður meðalsúrefnisflutningshraði yfir tímabilið nóvember til og með febrúar, fyrir 10 ára tímabil veðurraðar á Kolgrafafjarðarbrú, og yfir meðaltalstímabil 2 til 40 daga í aðdraganda hvers viðmiðunardags. Reiknuð gildi þriggja viðmiðunardaga eru sérstaklega dregin fram með mismunandi litum punktum.



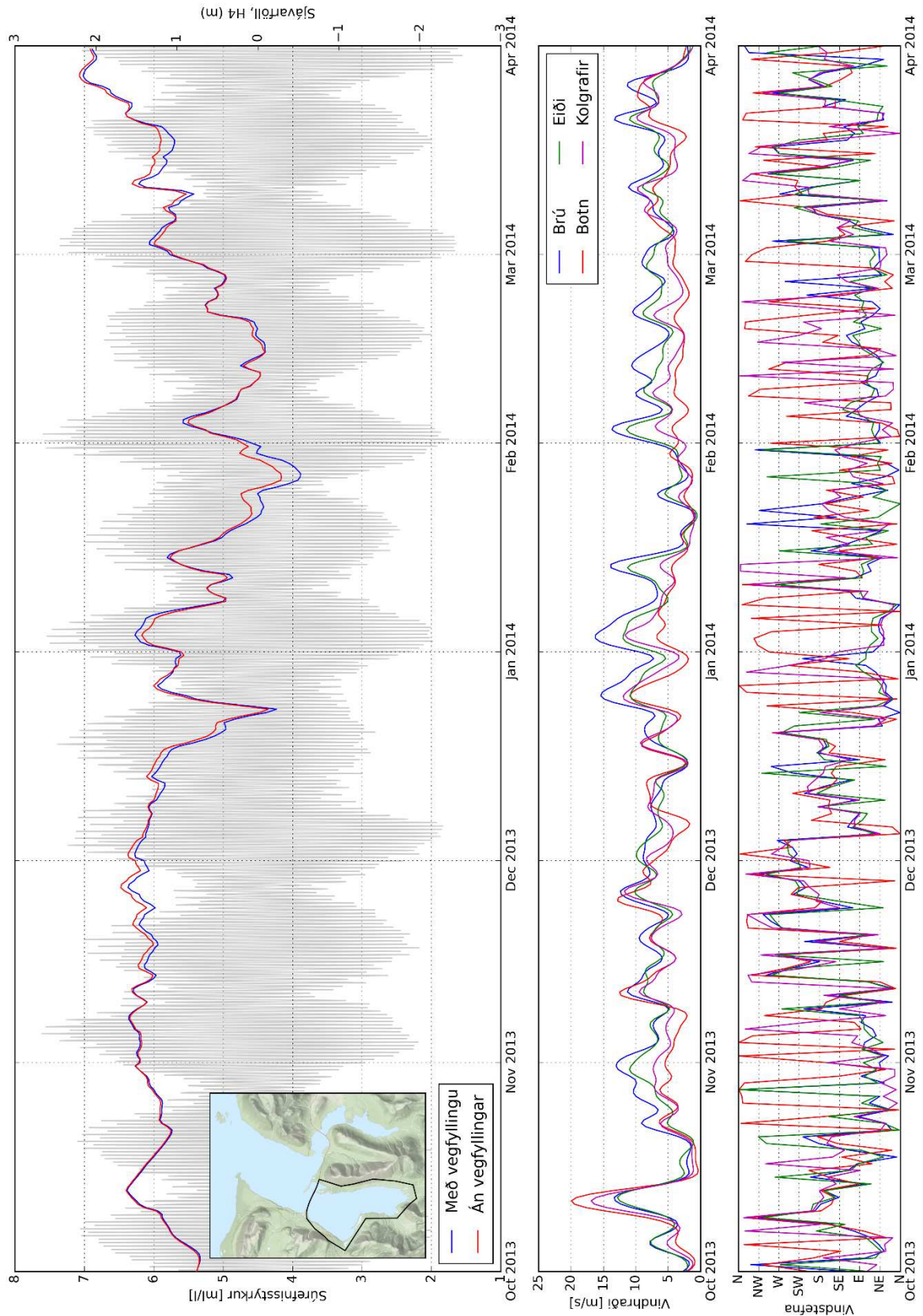
Mynd 97. Vindhraði frá Harmonie veðurlíkaninu þann 27. janúar 2014 kl 13:00.



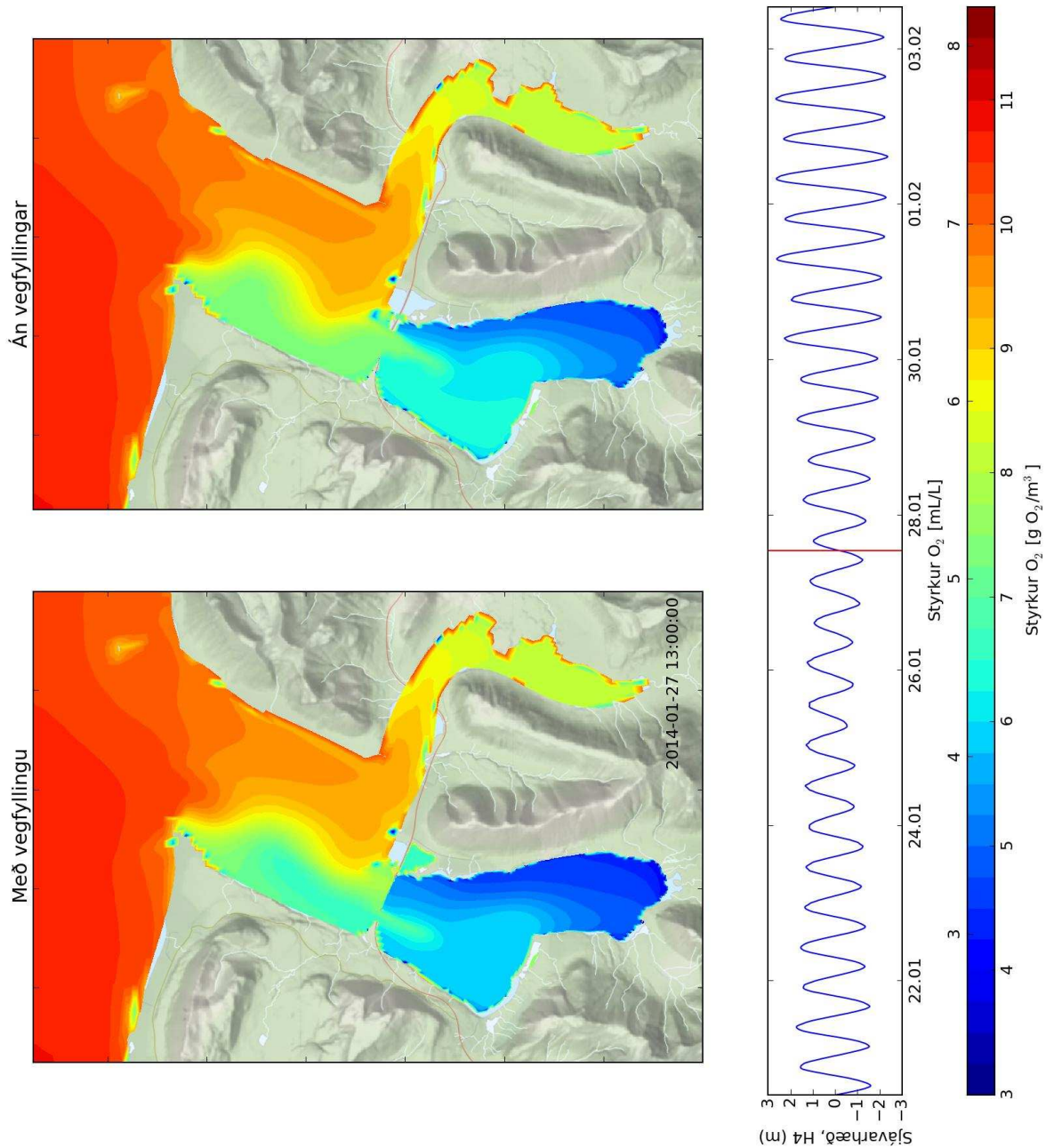
Mynd 98. Vindhraði frá Harmonie veðurlíkaninu þann 8. febrúar 2014 kl 23:00.



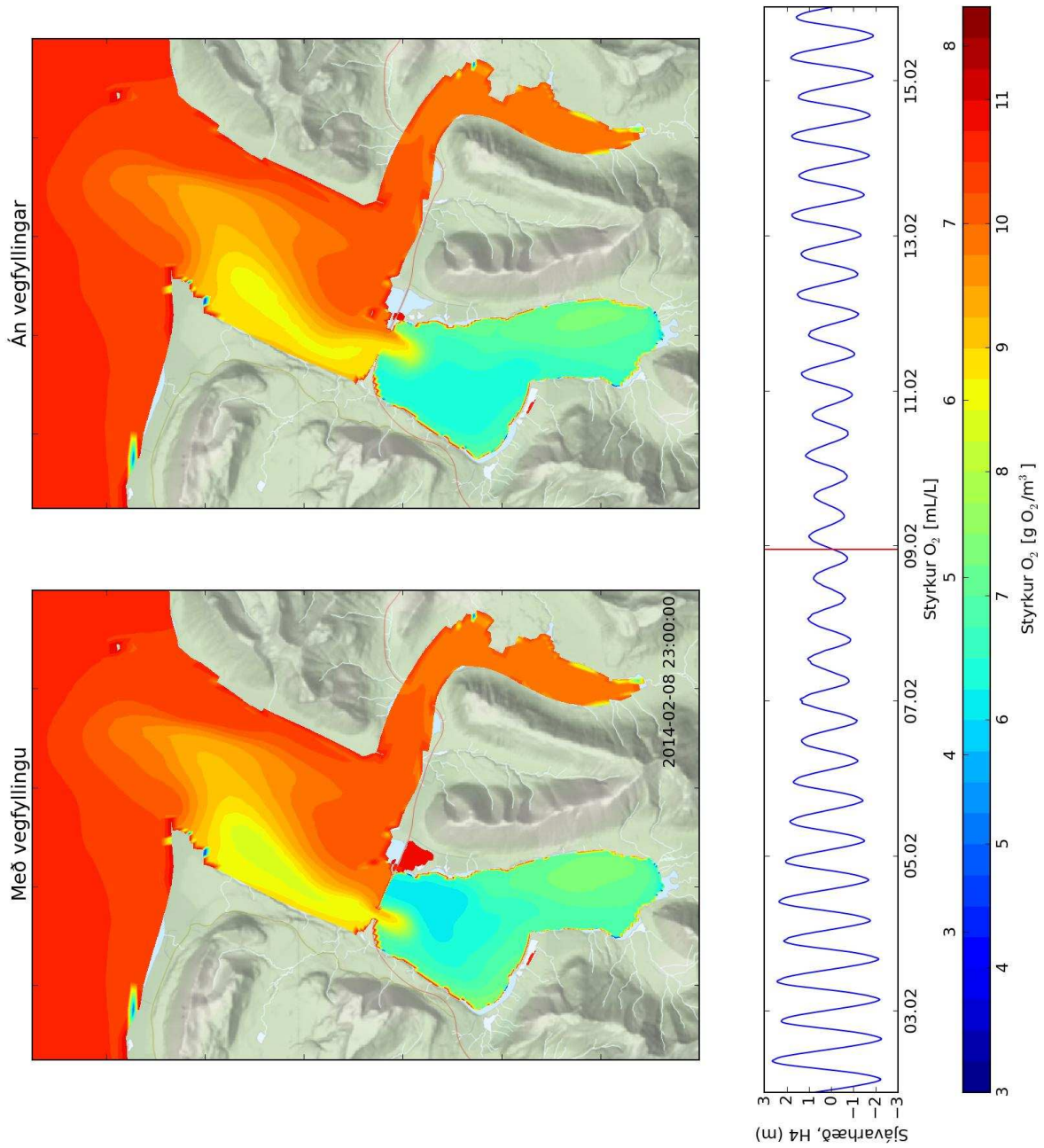
Mynd 99. Reiknað rennsli yfir þröskuld Kolgrafafjarðar með og án vegfyllingar.



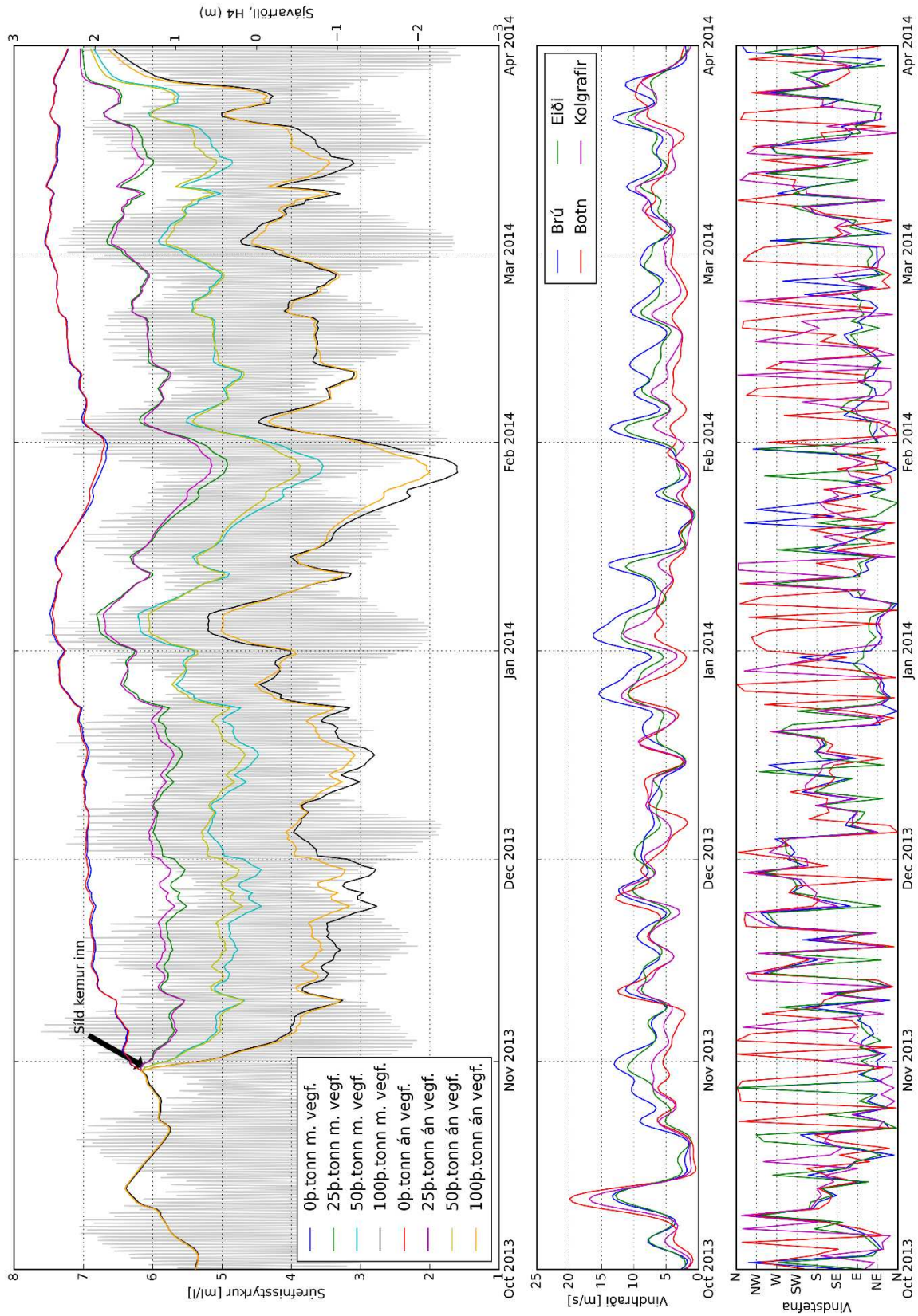
Mynd 100. Reiknaður meðalsúrefnisstyrkur með og án vegfyllingar innan vegstæðis (svæði afmarkað á korti með svartri línu) ásamt vindhraða (5 daga láhleypisúni), -stefnu (24 klst meðaltal) og sjávarföllum innan vegfyllingar.



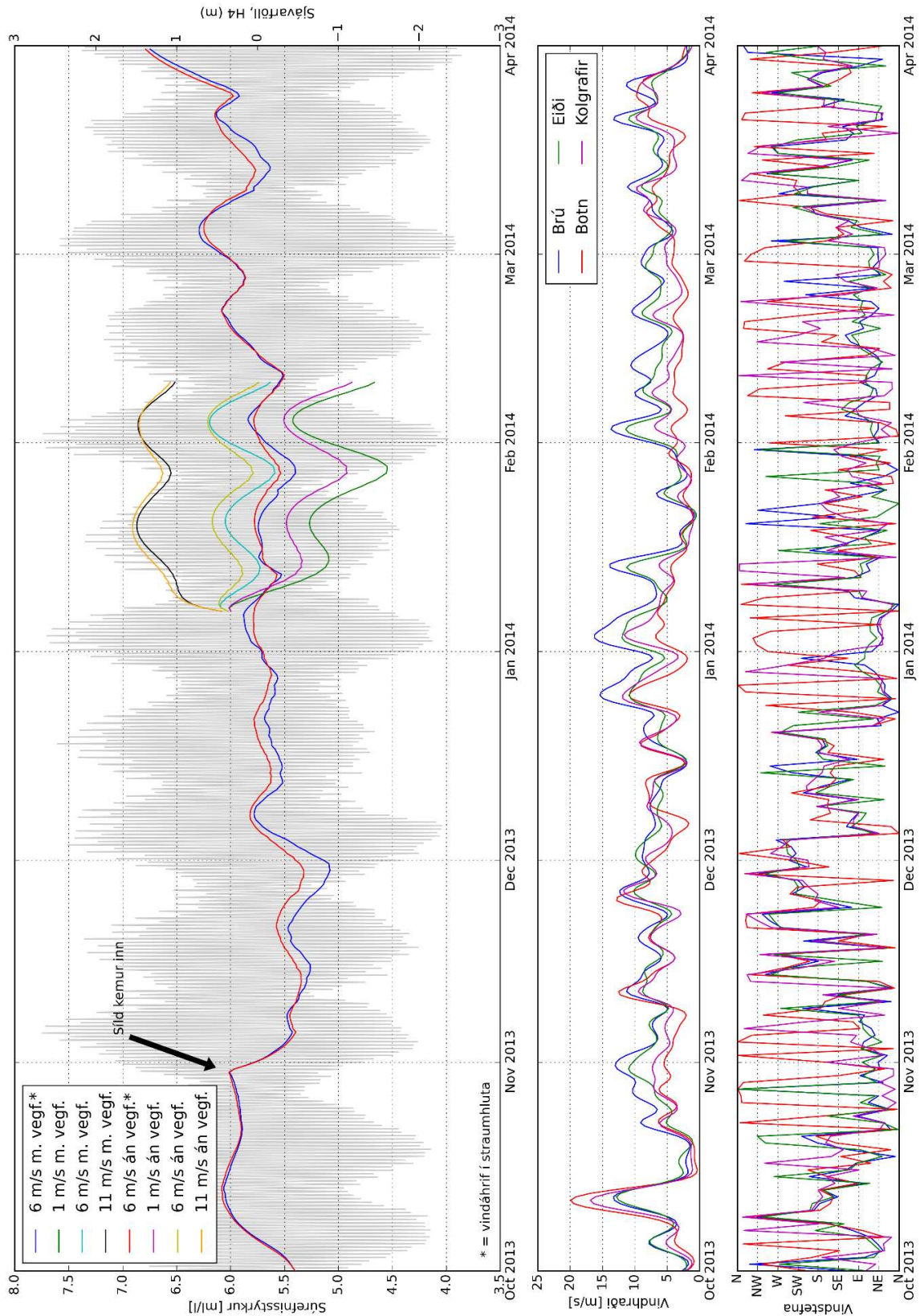
Mynd 101. Samanburður reiknaðs súrefnisstyrks með og án vegfyllingar þegar meðalsúrefnisstyrkur í innri firði er heldur lægri með tilkomu vegfyllingar.



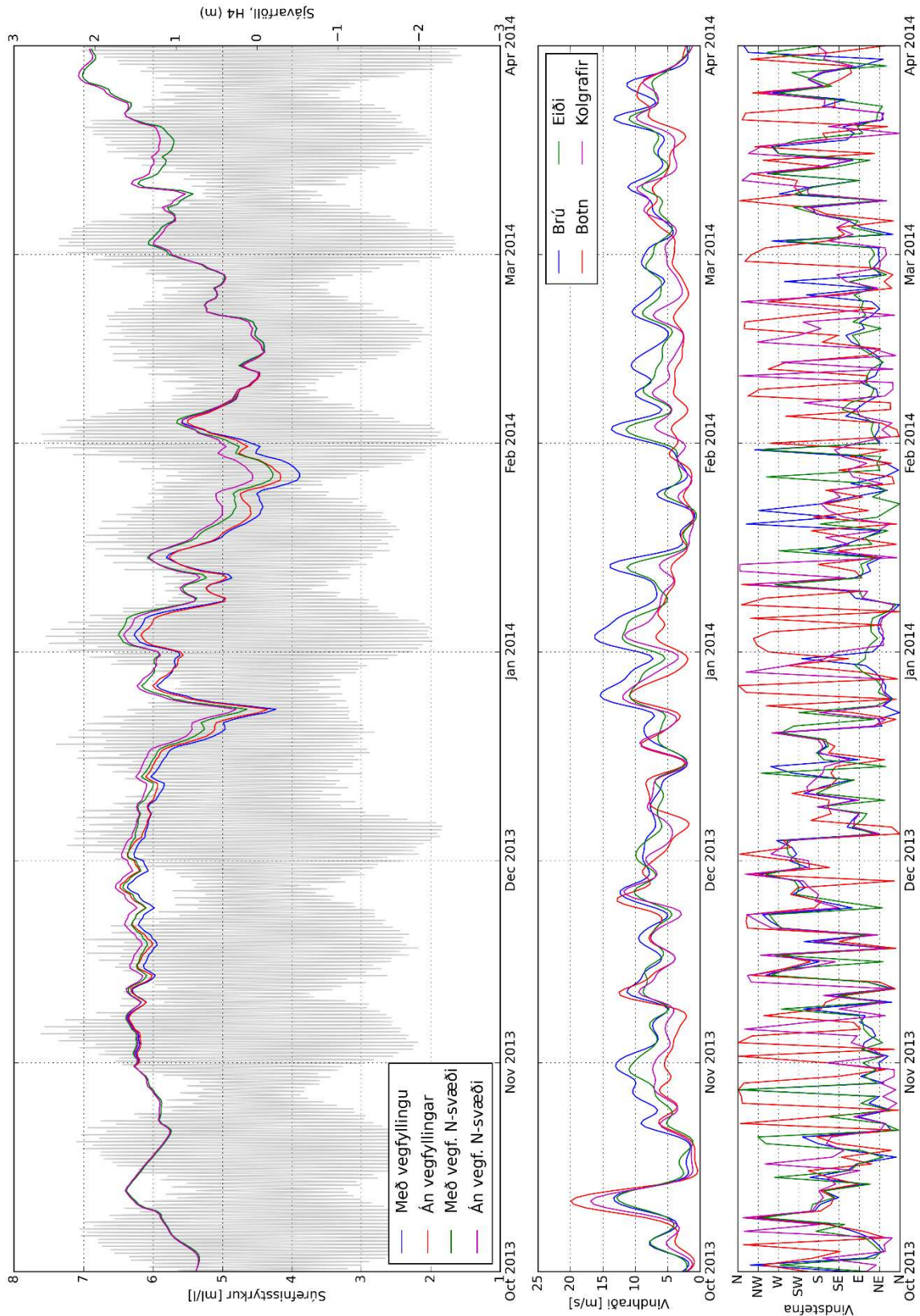
Mynd 102. Samanburður reiknaðs súrefnisstyrks með og án vegfyllingar þegar óverulegur munur er á meðalsúrefnisstyrk í innri firði.



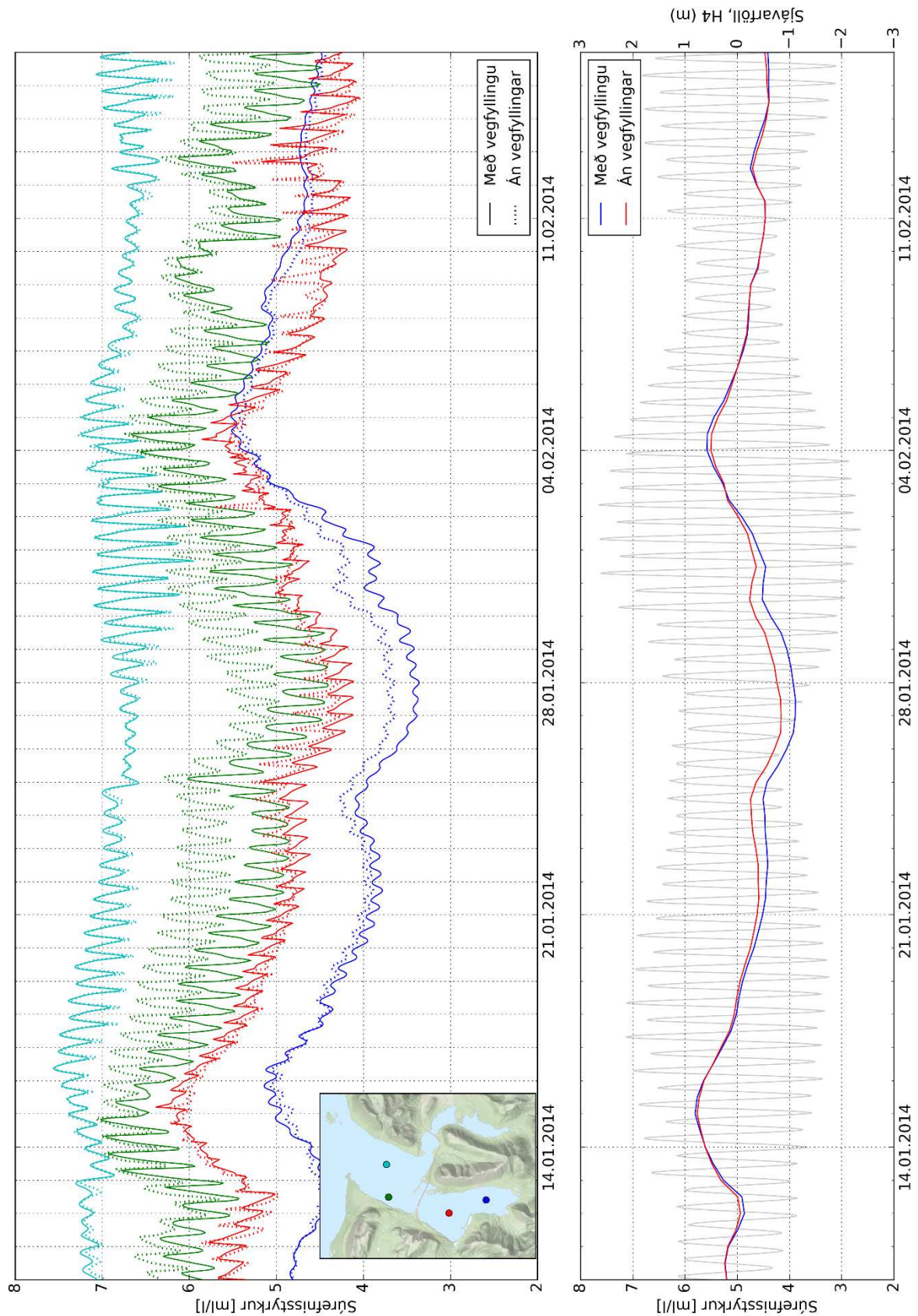
Mynd 103. Reiknaður meðalsúrefnisstyrkur með og án vegfyllingar innan vegstæðis fyrir mismunandi mikið fast álag vegna síldar ásamt vindhraða (5 daga lághleypisun), -stefnu (24 klst meðaltal) og sjávarföllum innan vegfyllingar.



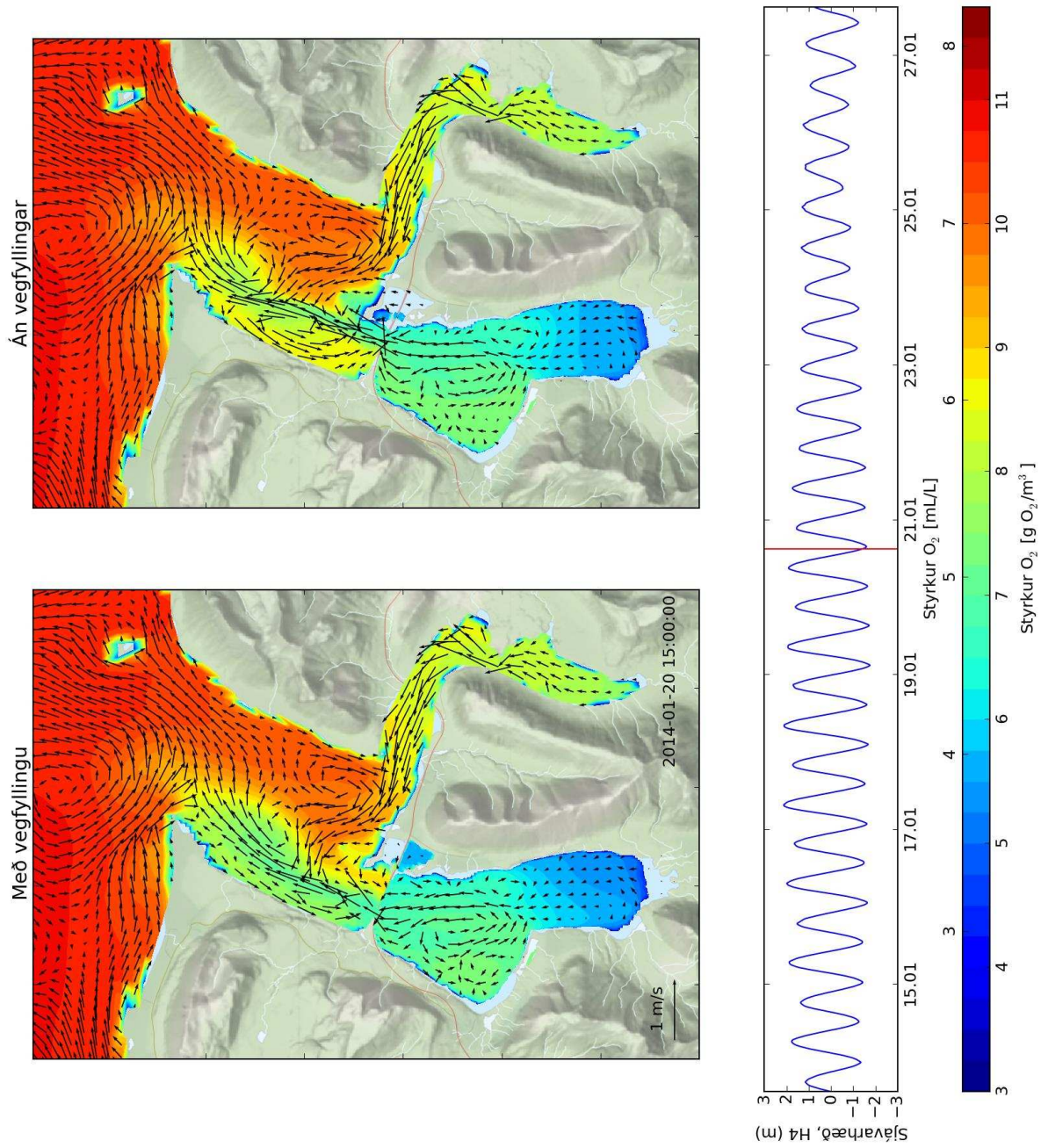
Mynd 104. Reiknaður meðalsúrefnisstyrkur með og án vegfyllingar innan vegstæðis með mismunandi vindáhrifum ásamt mældum vindhraða (5 daga lánleypisun), -stefnu (24 klst meðaltal) og sjávarföllum innan vegfyllingar. Álag allra tilvika er fast í tíma og eru 25 þúsund tonn af síld innan vegfyllingar.



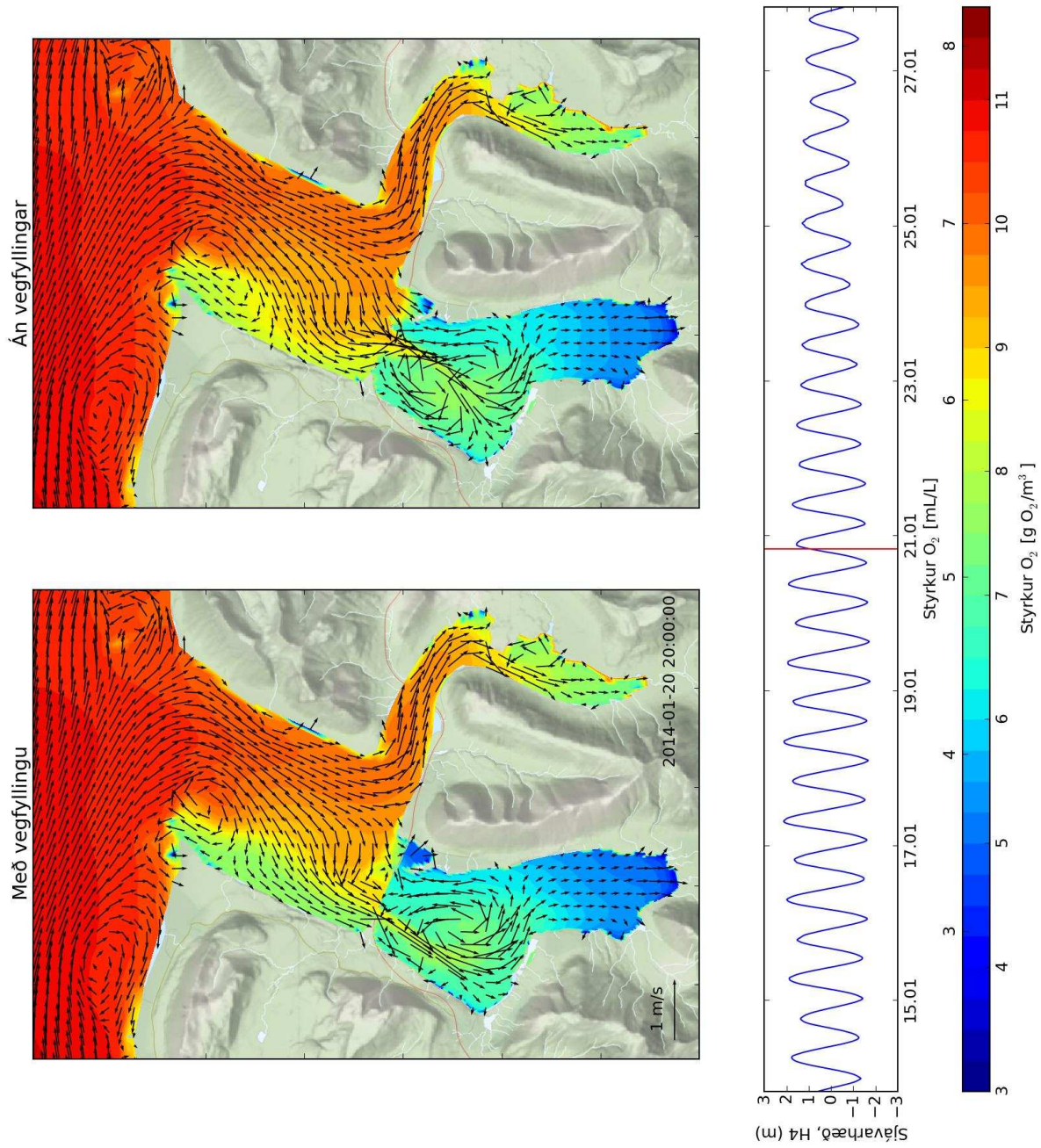
Mynd 105. Reiknaður meðalsúrefnisstyrkur með og án vegfyllingar innan vegstæðis, síld dreift um norðursvæði innri fjarðar samanborið við grunddreifingu skv. aðlögun líkans, ásamt mældum vindhraða (5 daga lánleypisíun), -stefnu (24 klst meðaltöl) og sjávarföllum innan vegfyllingar.



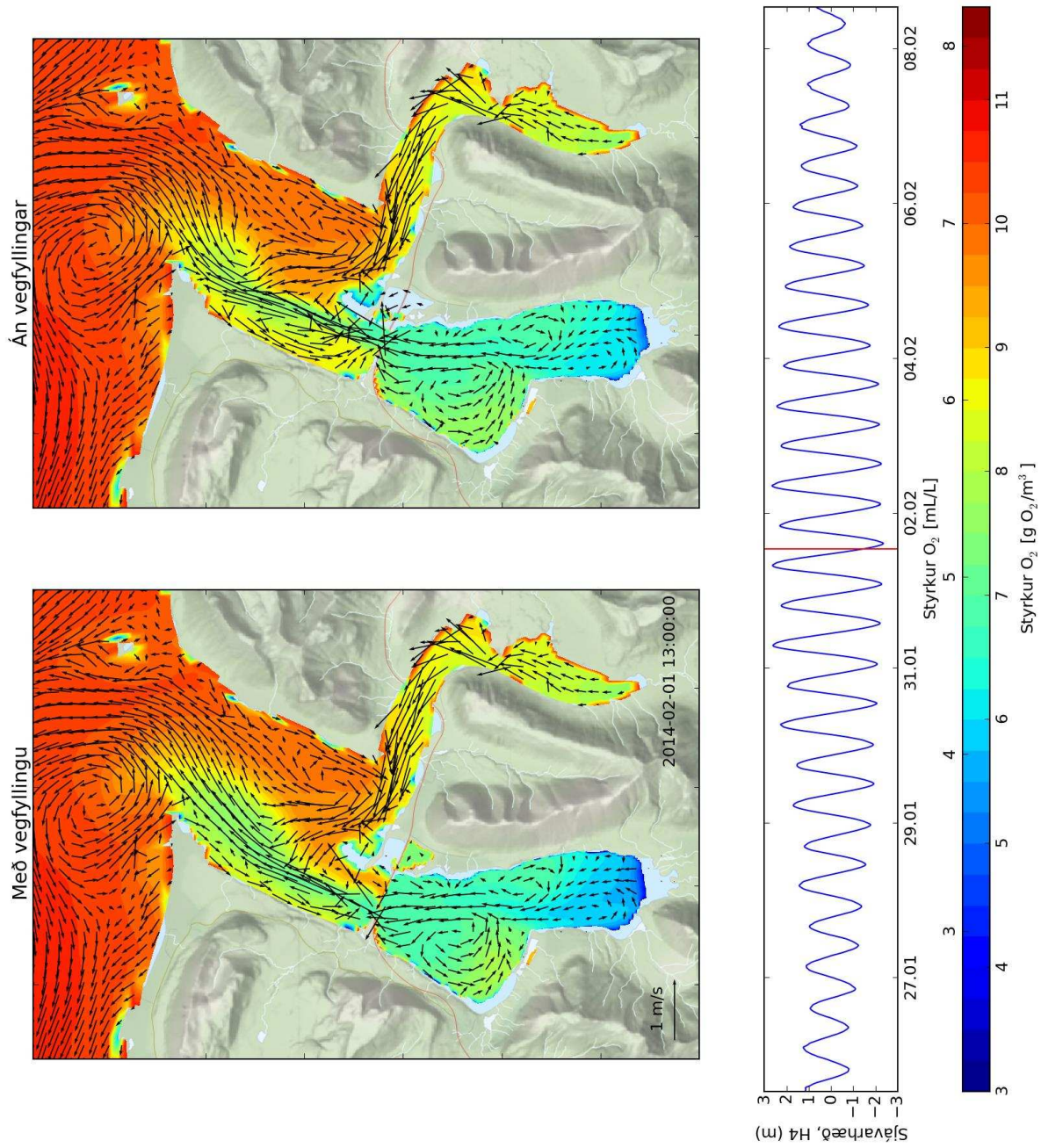
Mynd 106. Reiknaður súrefnisstyrkur í völdum punktum í innri og ytri firði, með og án vegfyllingar (efra), og reiknaður meðalsúrefnisstyrkur, 12 klst meðaltöl, í innri firði með og án vegfyllingar (neðri).



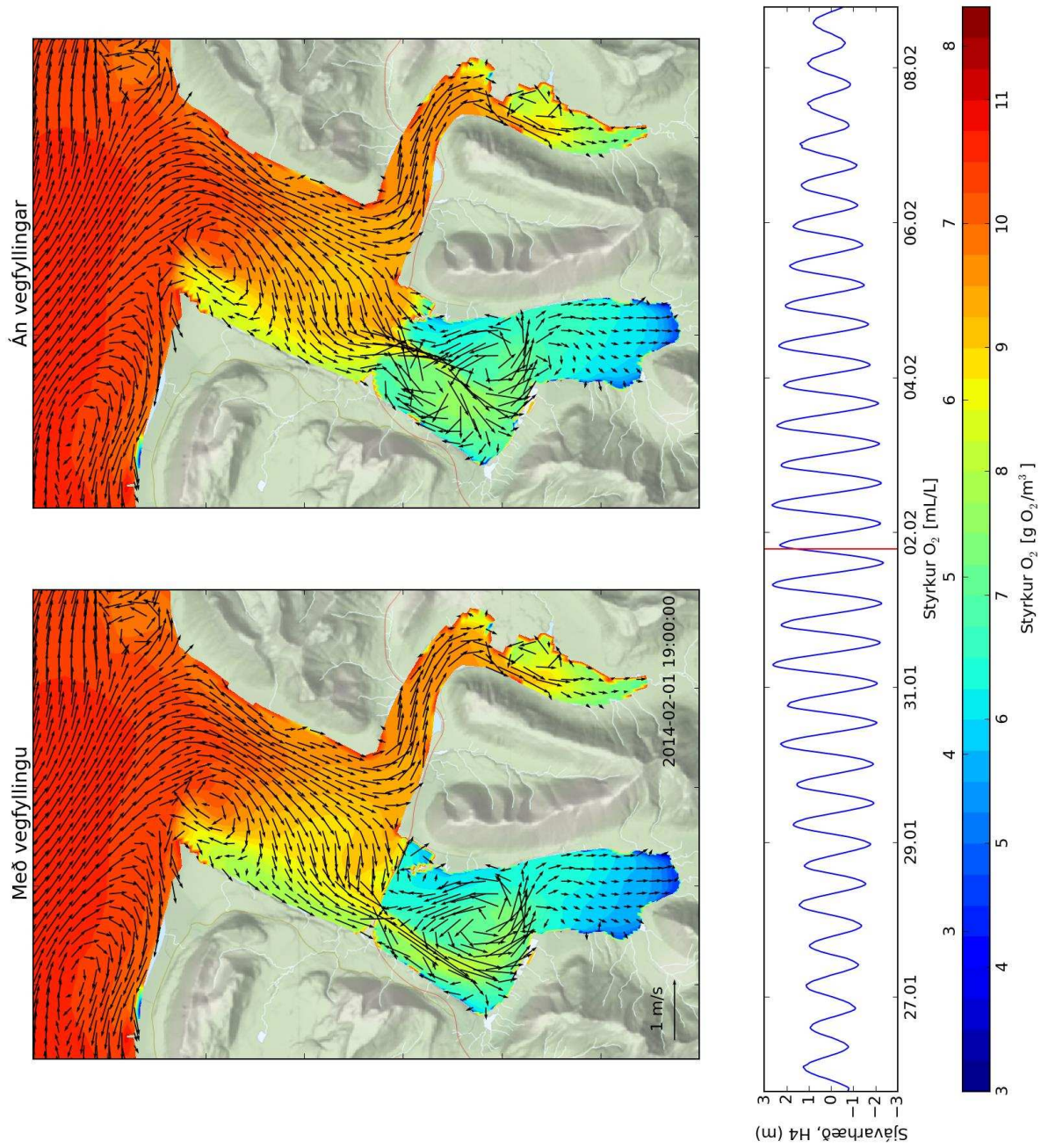
Mynd 107. Reiknaðar straumörvar lagðar ofan á reiknaðan súrefnisstyrk, með og án vegfyllingar, undir lok útfalls 20. janúar 2014, kl. 15.



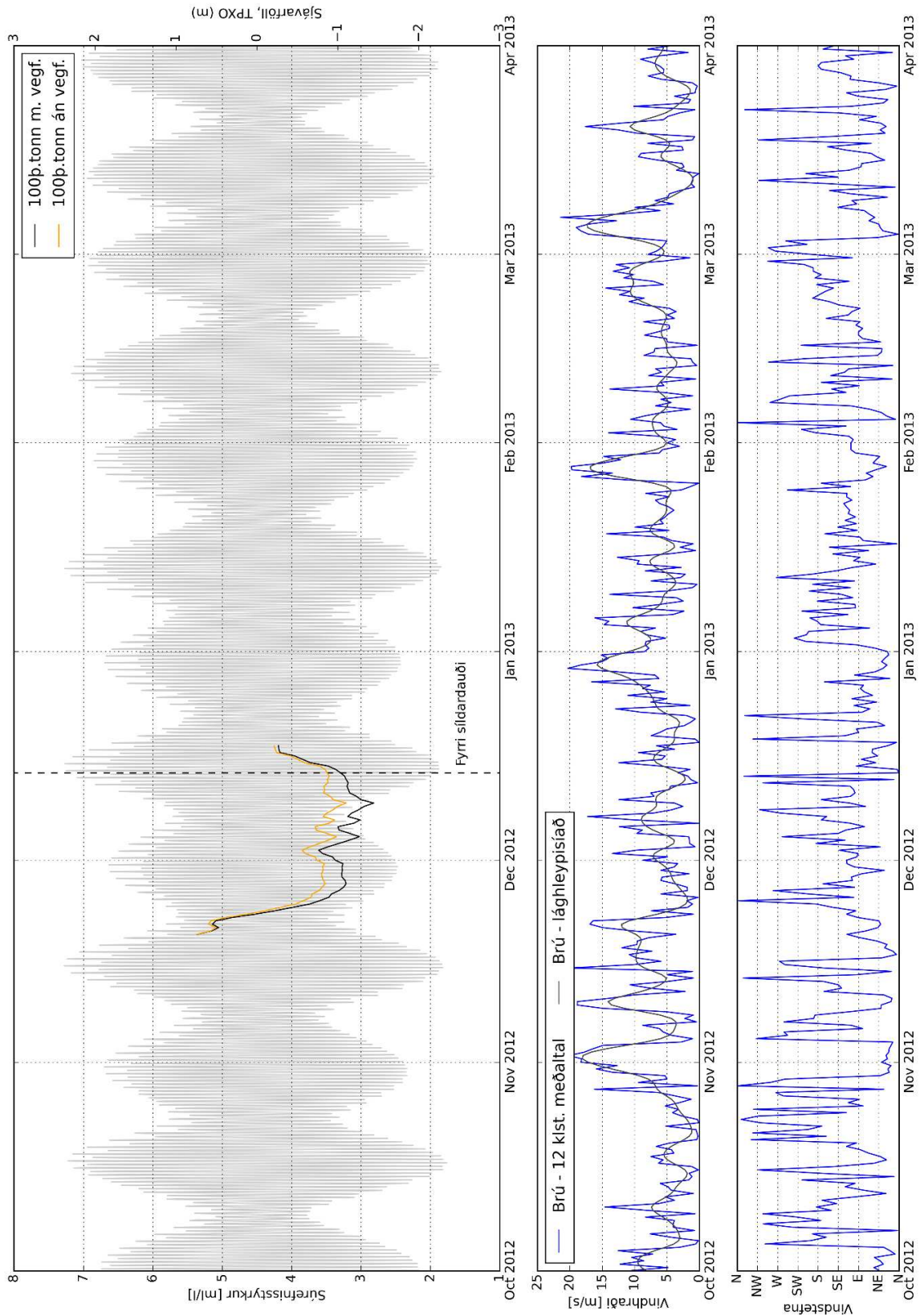
Mynd 108. Reiknaðar straumörvar lagðar ofan á reiknaðan súrefnisstyrk, með og án vegfyllingar, undir lok aðfalls 20. janúar 2014, kl. 20.



Mynd 109. Reiknaðar straumörvar lagðar ofan á reiknaðan súrefnisstyrk, með og án vegfyllingar, undir lok útfalls 1. febrúar 2014, kl. 13.



Mynd 110. Reiknaðar straumörvar lagðar ofan á reiknaðan súrefnisstyrk, með og án vegfyllingar, undir lok aðfalls 1. febrúar 2014, kl. 19.

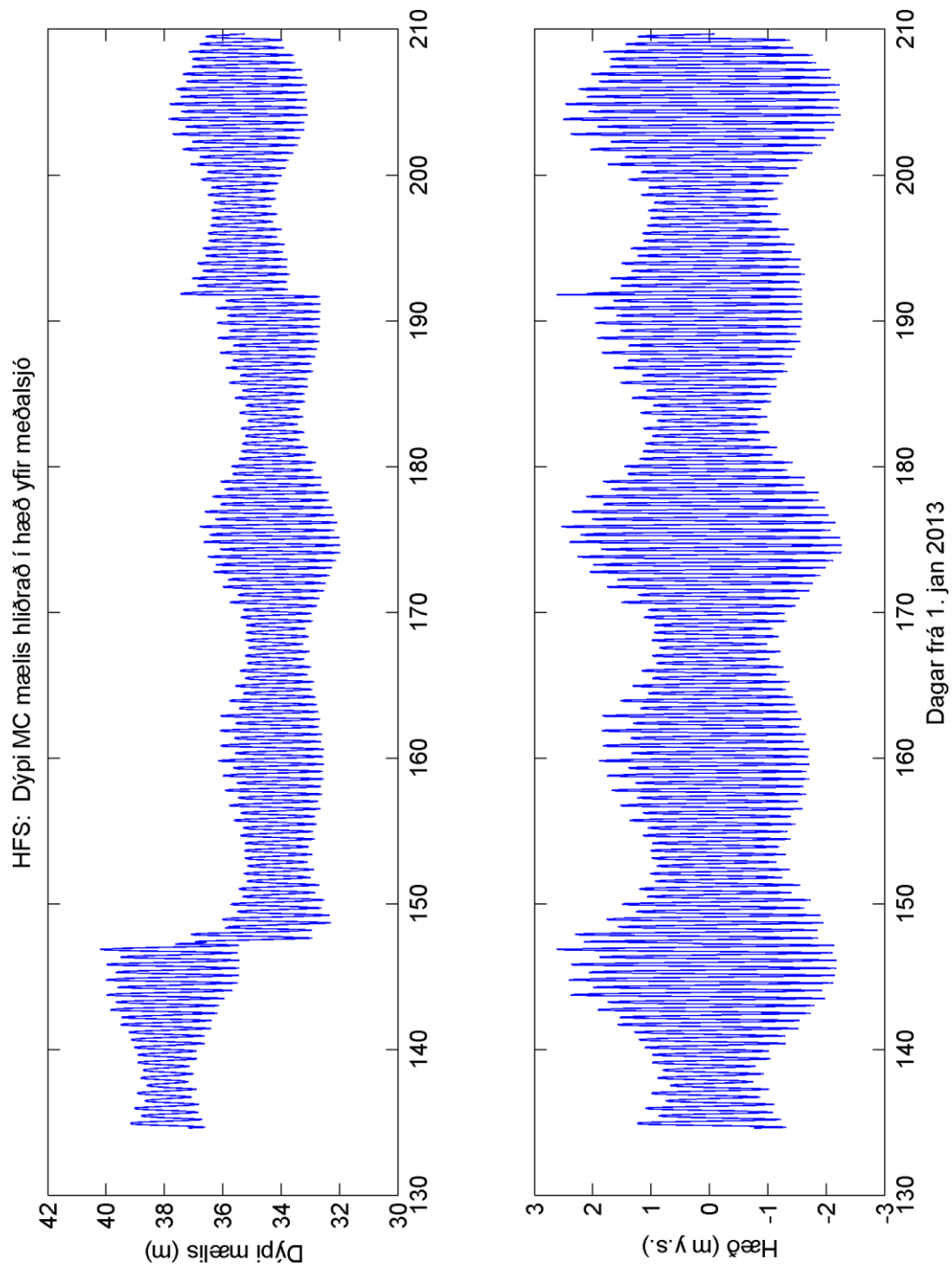


Mynd 111. Reiknaður meðalsúrefnisstyrkur með og án vegfyllingar innan vegstæðis yfir tímabil síldardauðans í desember 2012 ásamt mældum vindhraða (5 daga lágheypisíun), -stefnu (24 klst meðaltöl) og sjávartölum innan vegfyllingar.

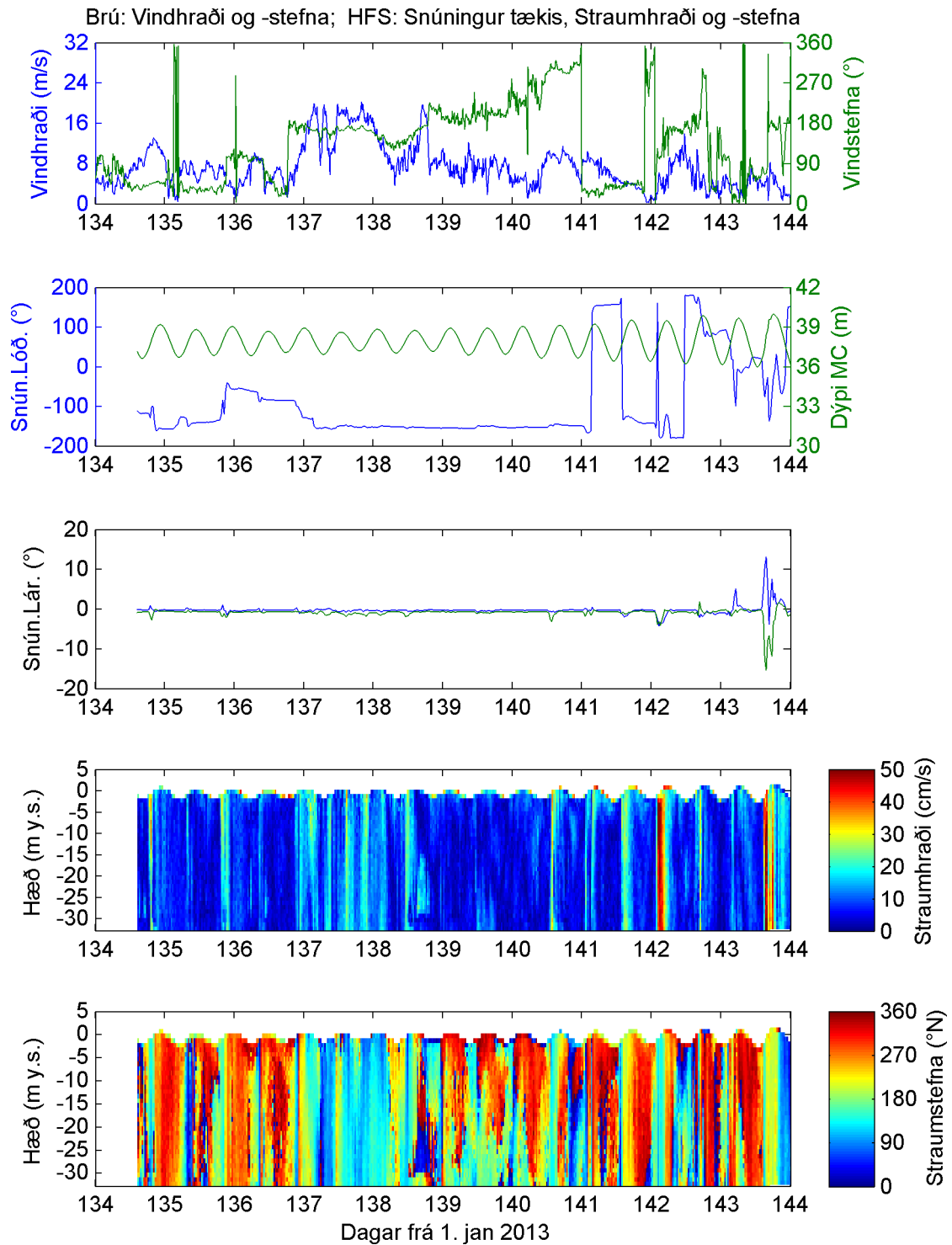
Viðaukar

- A. Straumsjármælingar
- B. Vatnsgæðamælingar
- C. Veðurlíkanreikningar
- D. Straumreikningar

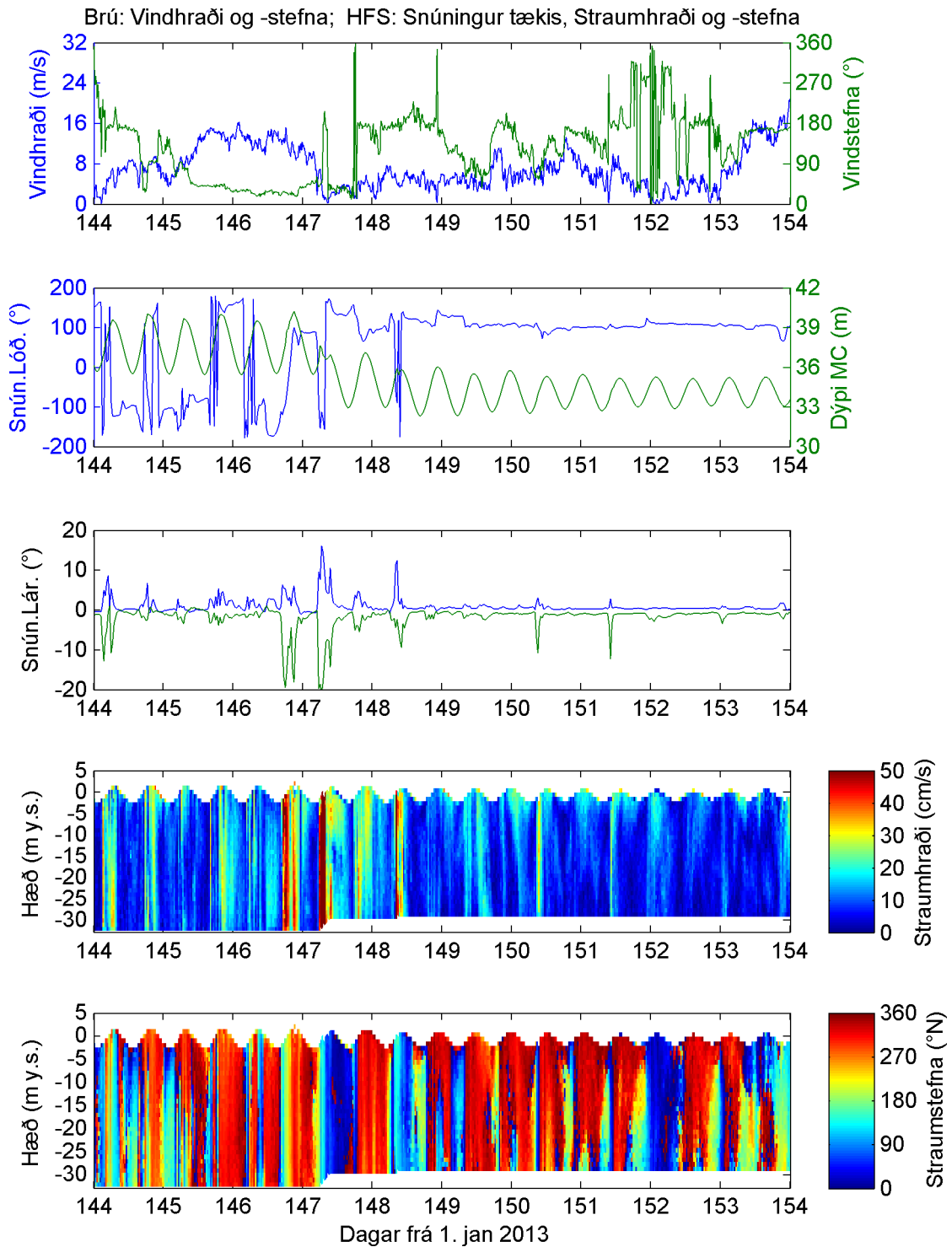
A. Straumsjármælingar



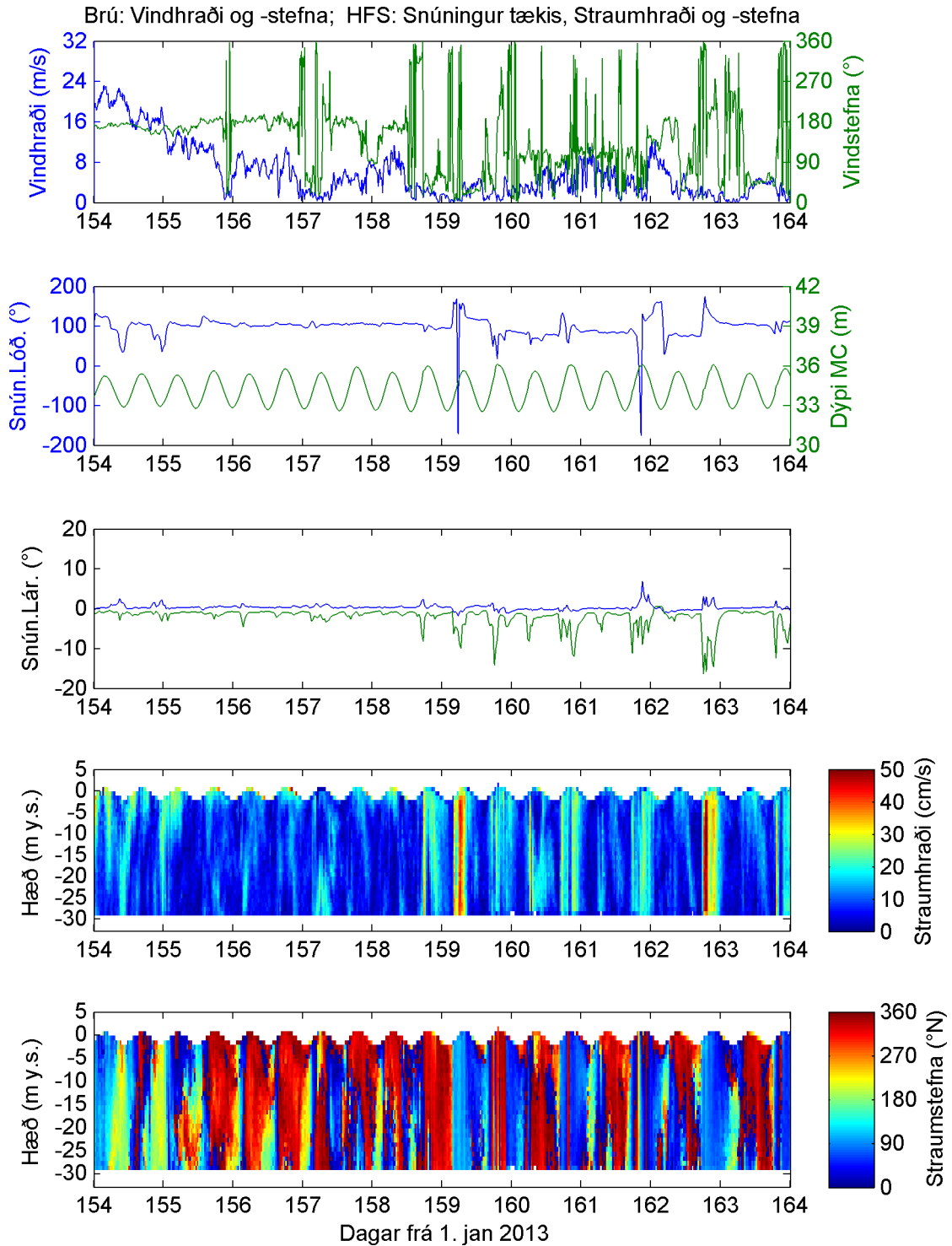
Mynd A. 1. Dýpi MicroCAT mælis á lögn HFS út frá mældum þrýstingi, hita og seltu (efra graf) fært yfir í hæð yfir meðalsjó (neðra graf). 2013-05-11 til 2013-07-30.



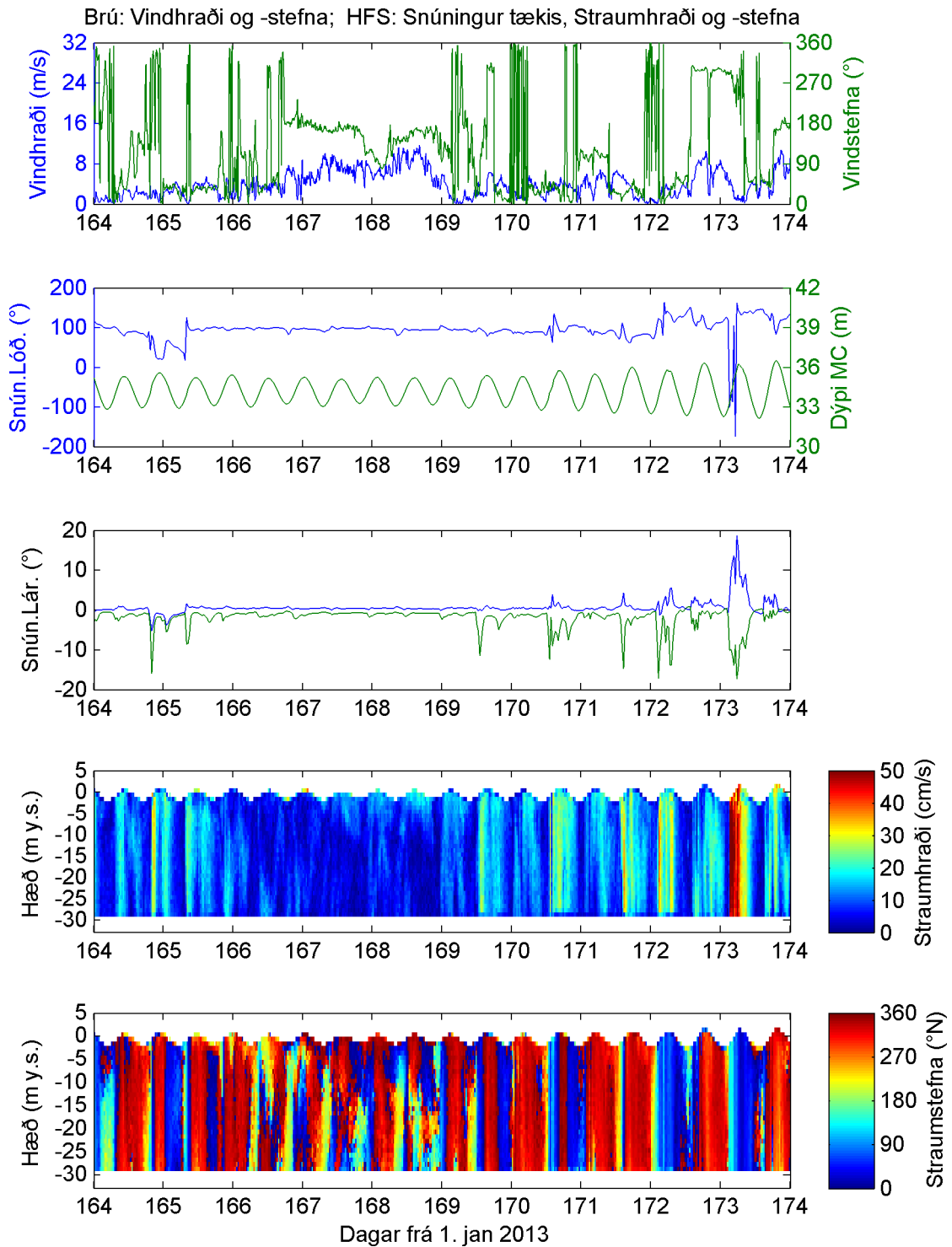
Mynd A. 2. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HFS: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-05-15 til 2013-05-25.



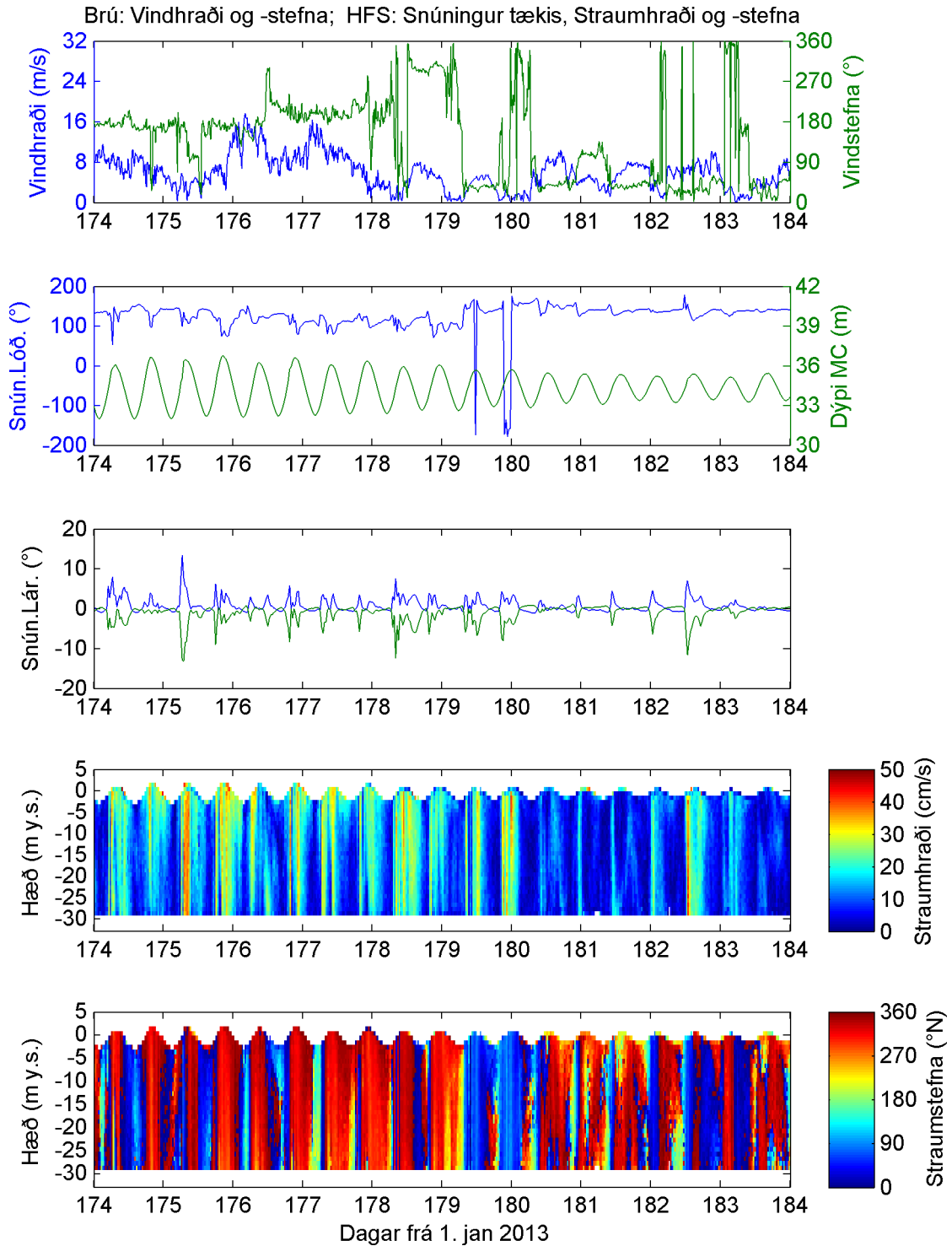
Mynd A. 3. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HFS: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-05-25 til 2013-06-04.



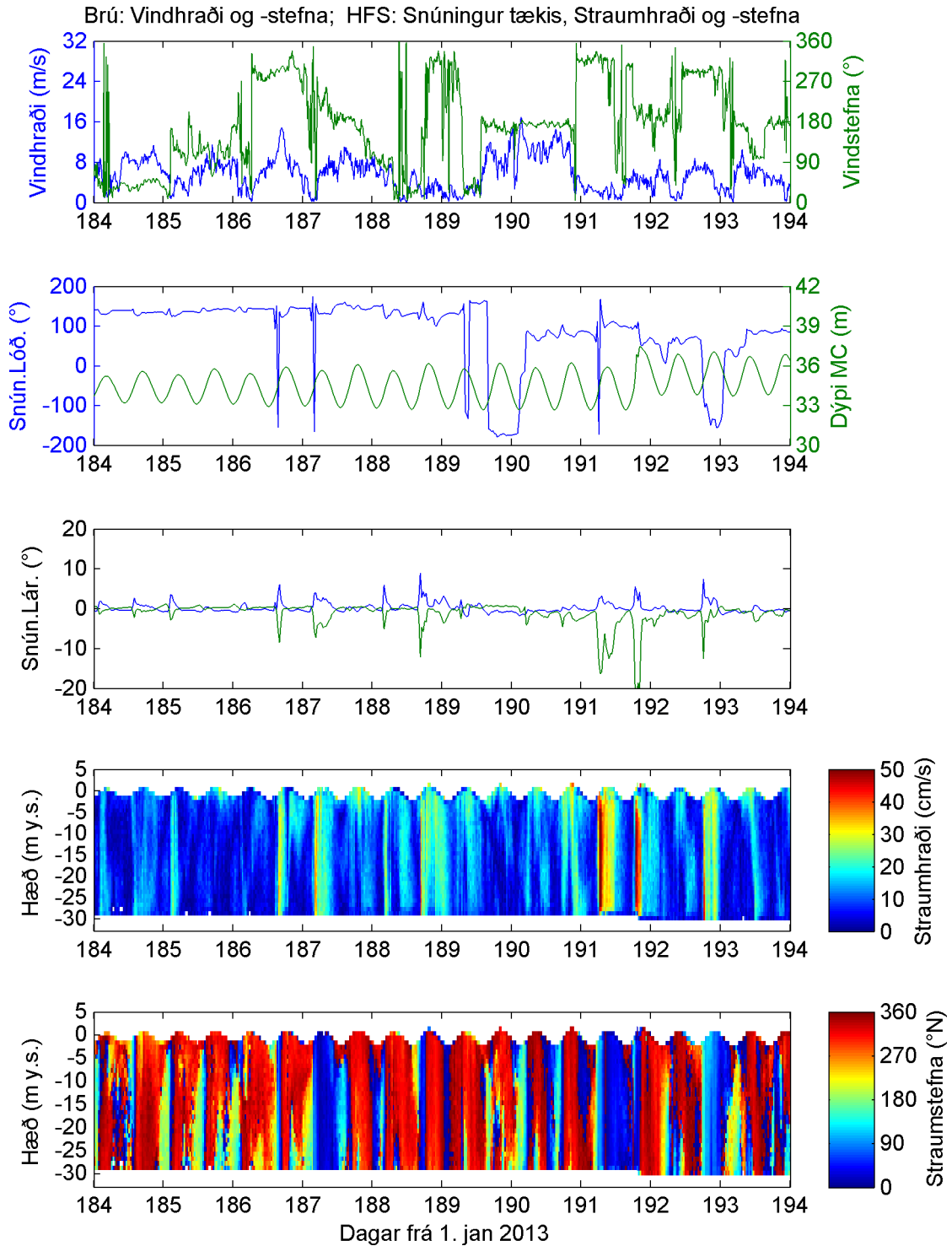
Mynd A. 4. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HFS: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-06-04 til 2013-04-14.



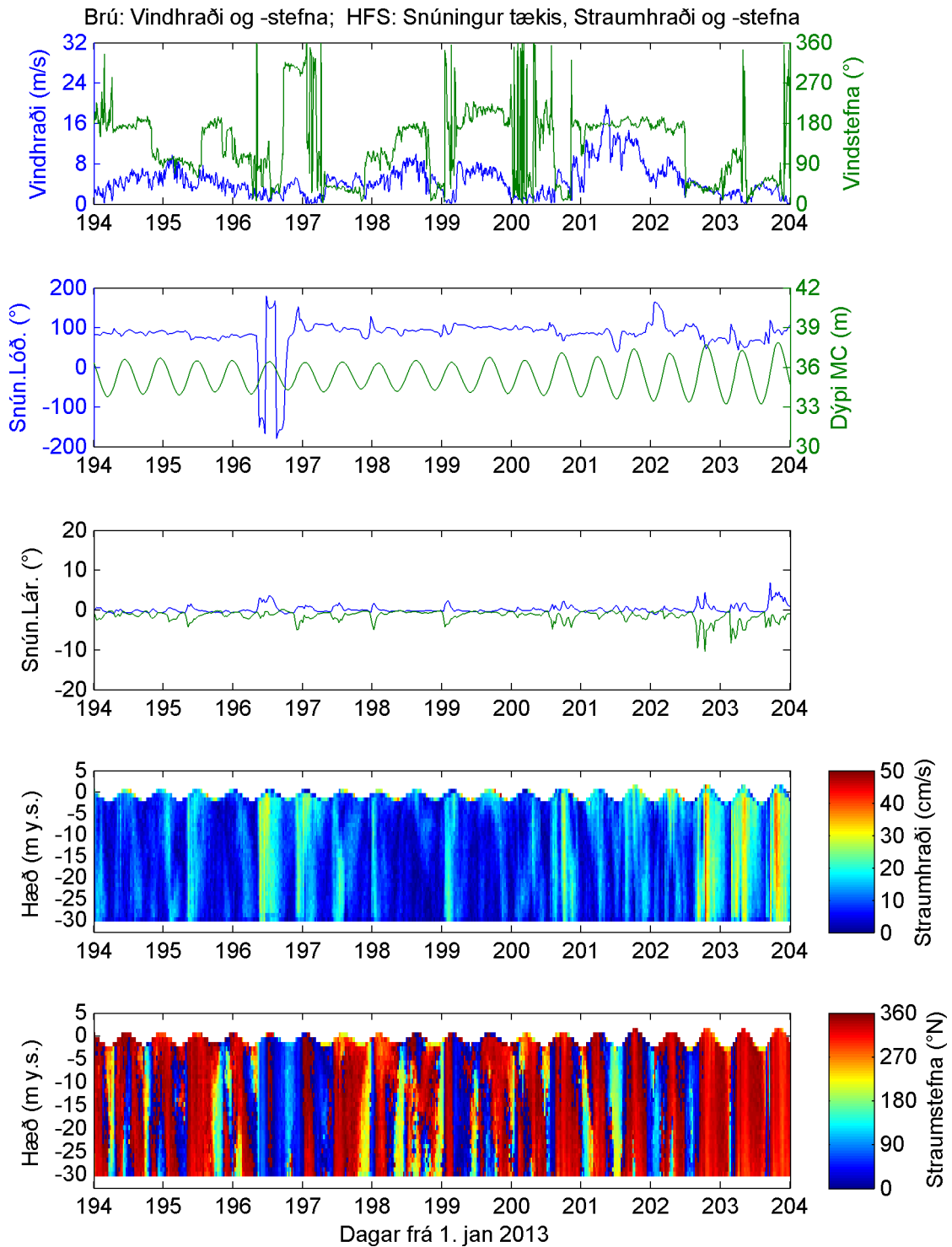
Mynd A. 5. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HFS: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-06-14 til 2013-06-24.



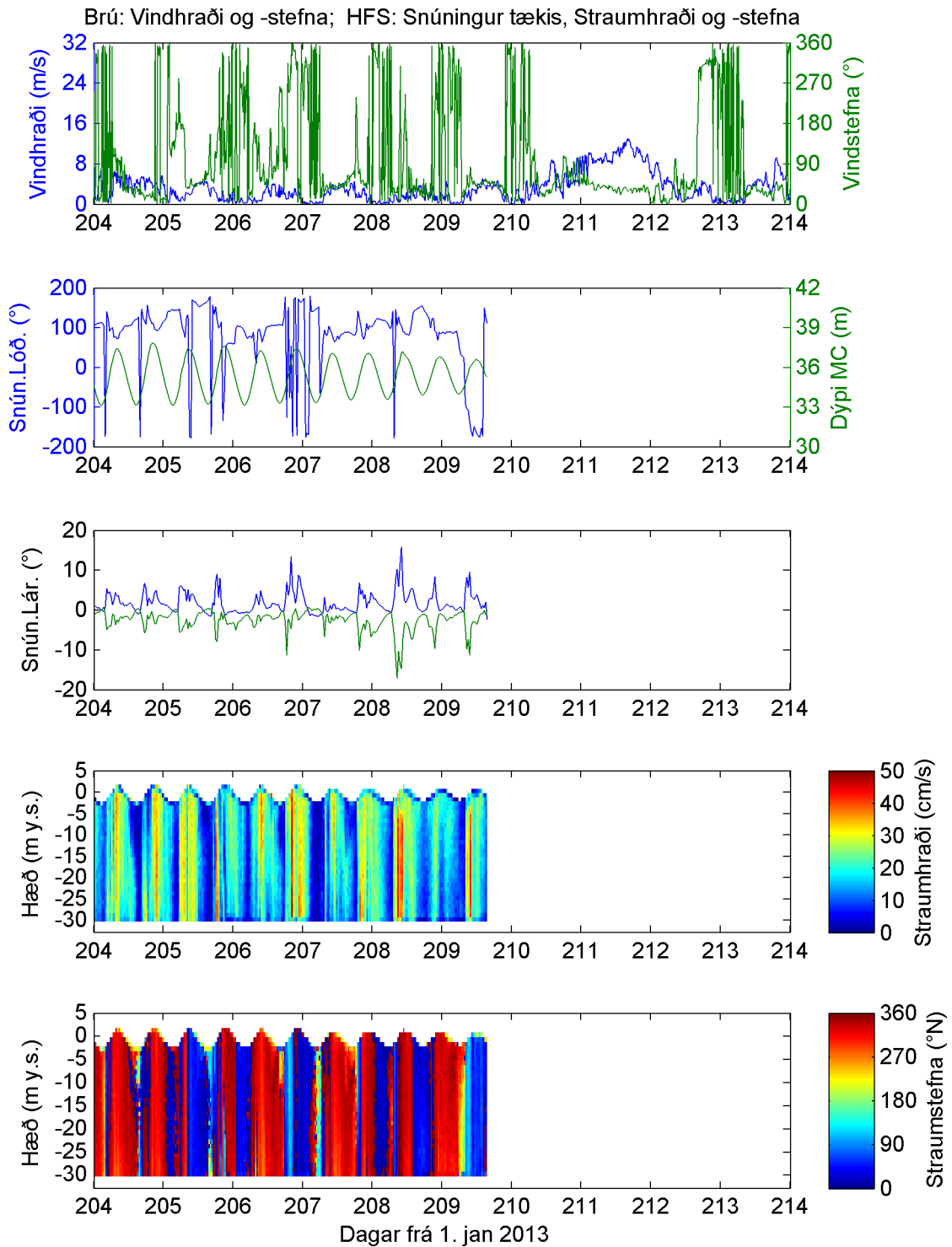
Mynd A. 6. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HFS: snúningur tækis og dýpi tilvarandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-06-24 til 2013-07-04.



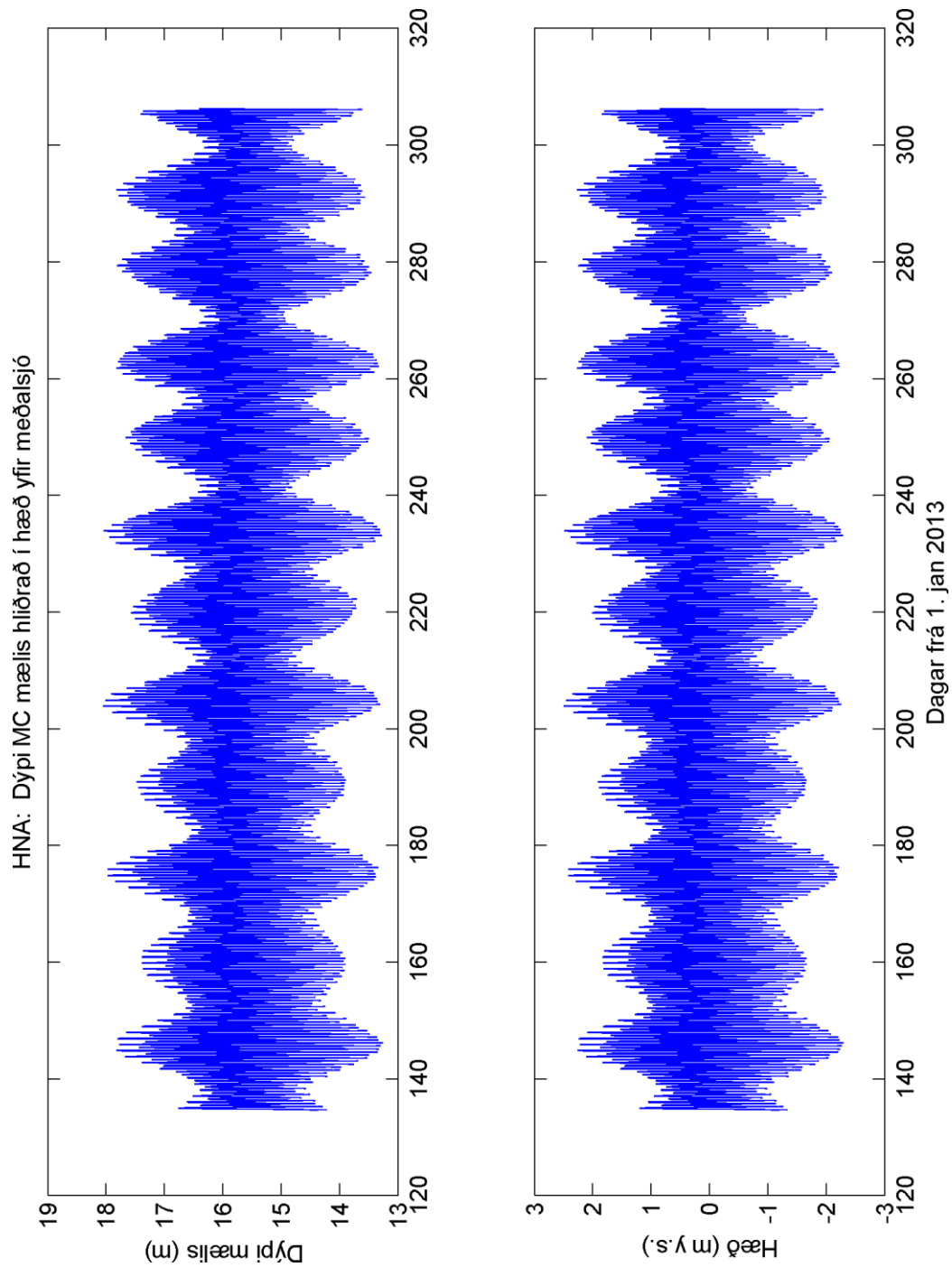
Mynd A. 7. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HFS: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-07-04 til 2013-07-14.



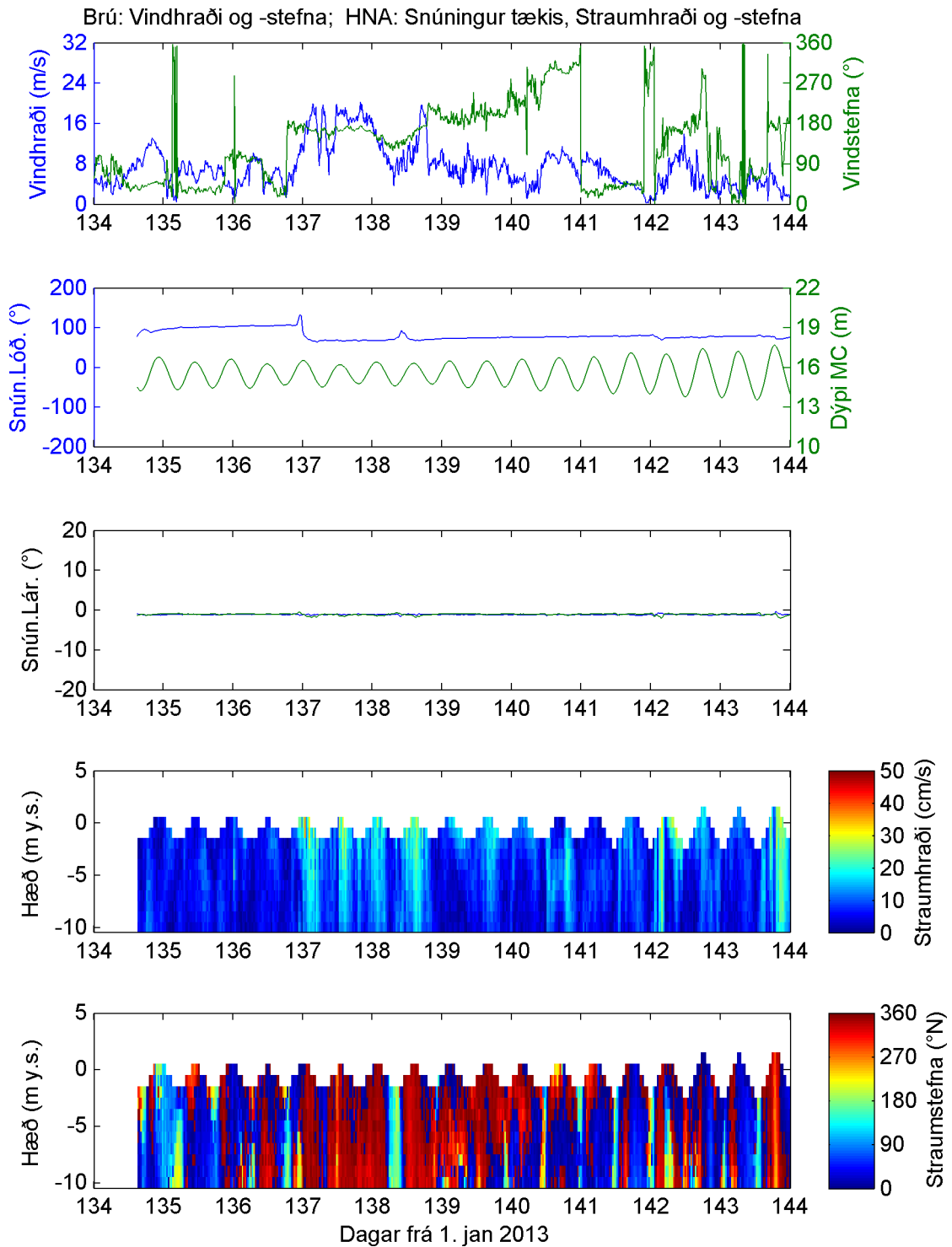
Mynd A. 8. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HFS: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-07-14 til 2013-07-24.



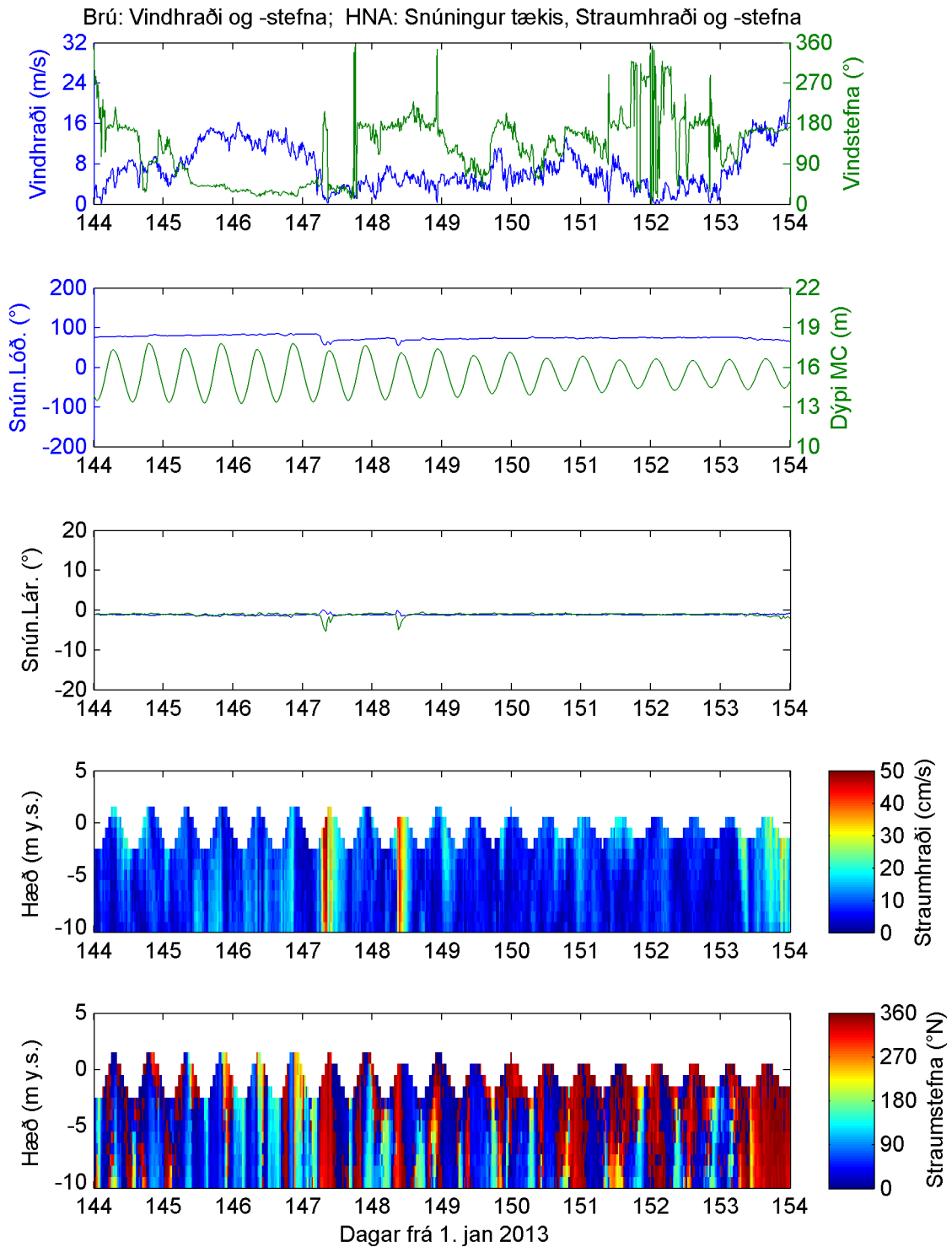
Mynd A. 9. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumshjá HFS: snúningur tækis og dýpi tilsvareandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-07-24 til 2013-08-03.



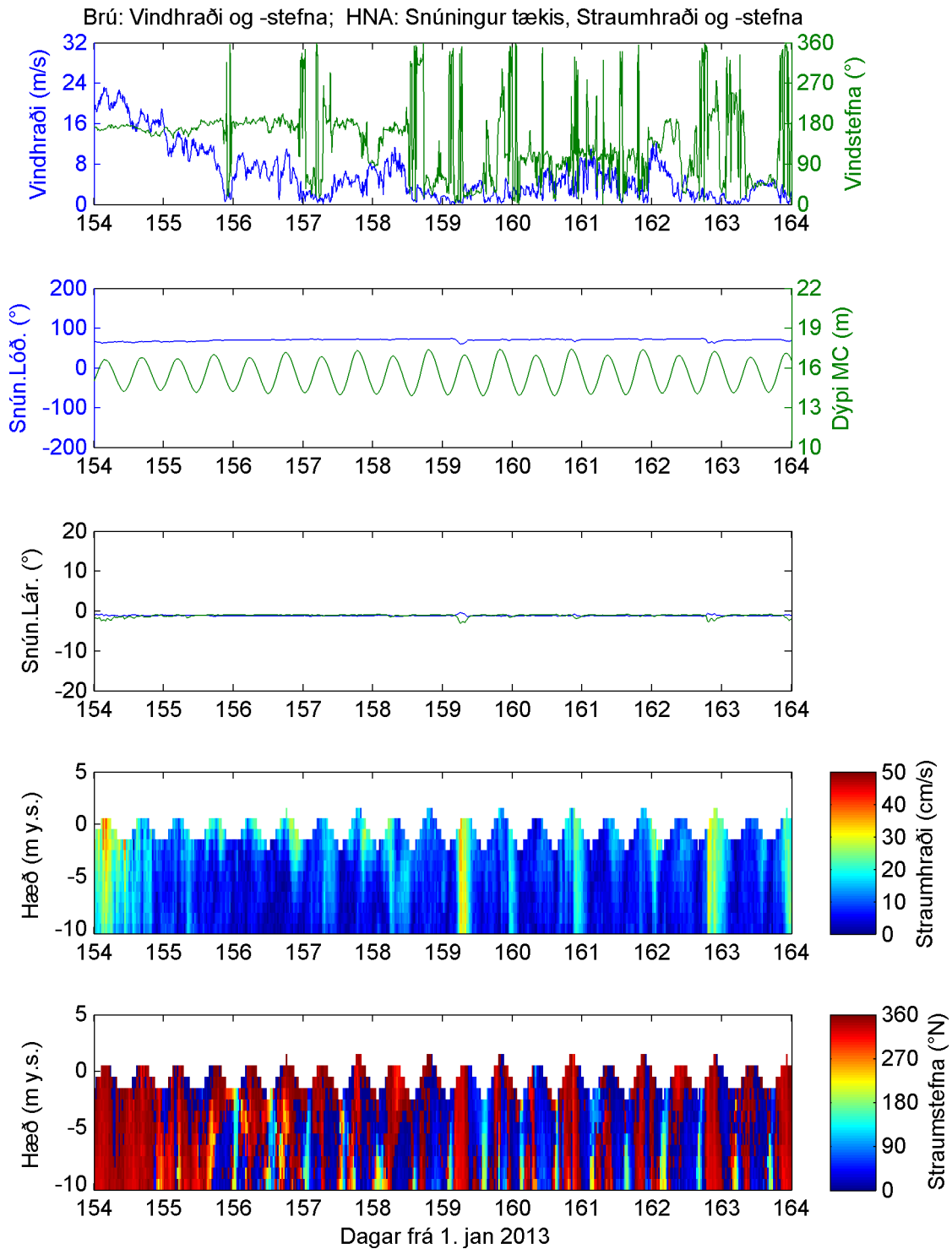
Mynd A. 10. Dýpi MicroCAT mælis á lögn HNA út frá mældum þrýstingi, hita og seltu (efra graf) fært yfir í hæð yfir meðalsjó (neðra graf). 2013-05-01 til 2013-11-17.



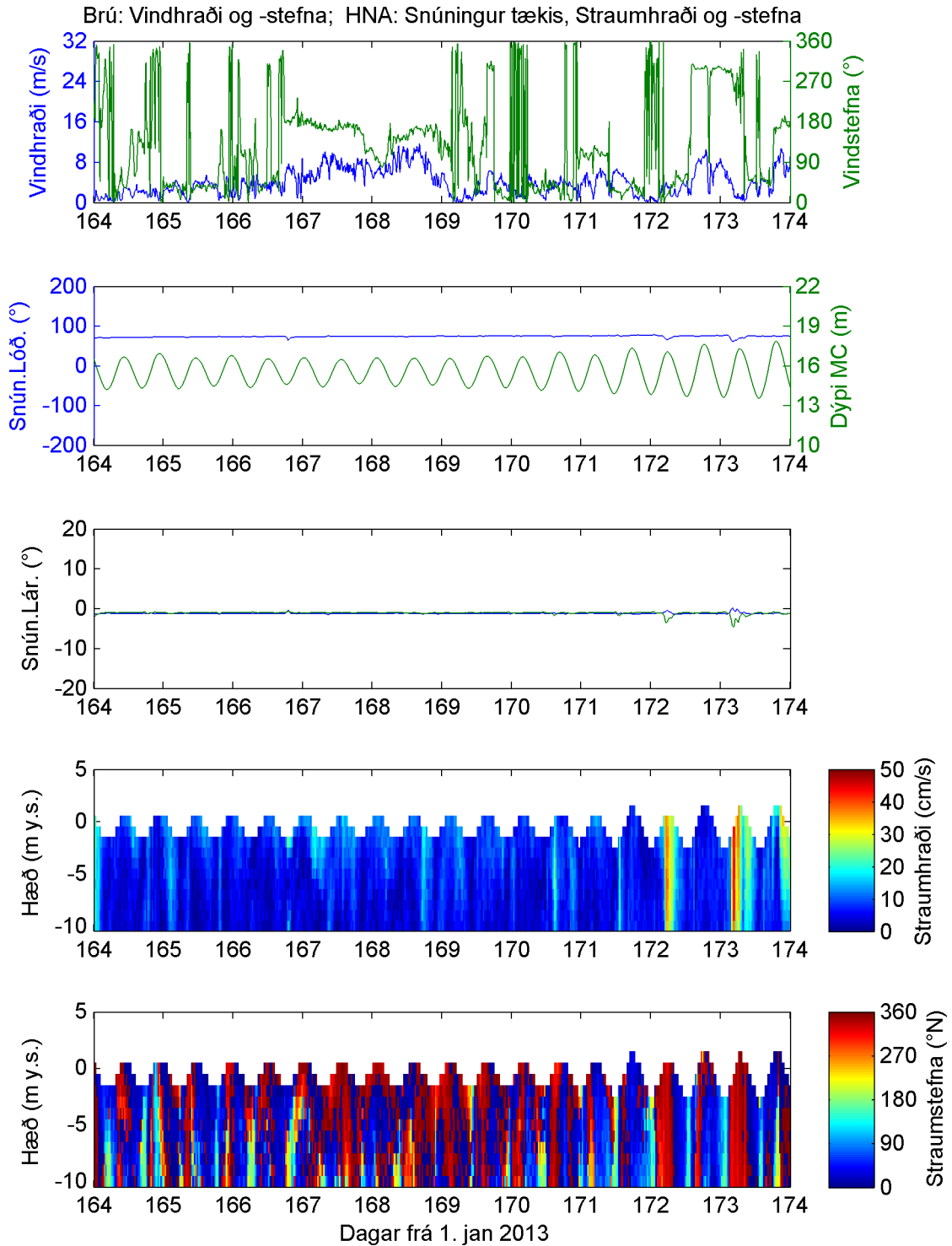
Mynd A. 11. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-05-15 til 2013-05-25.



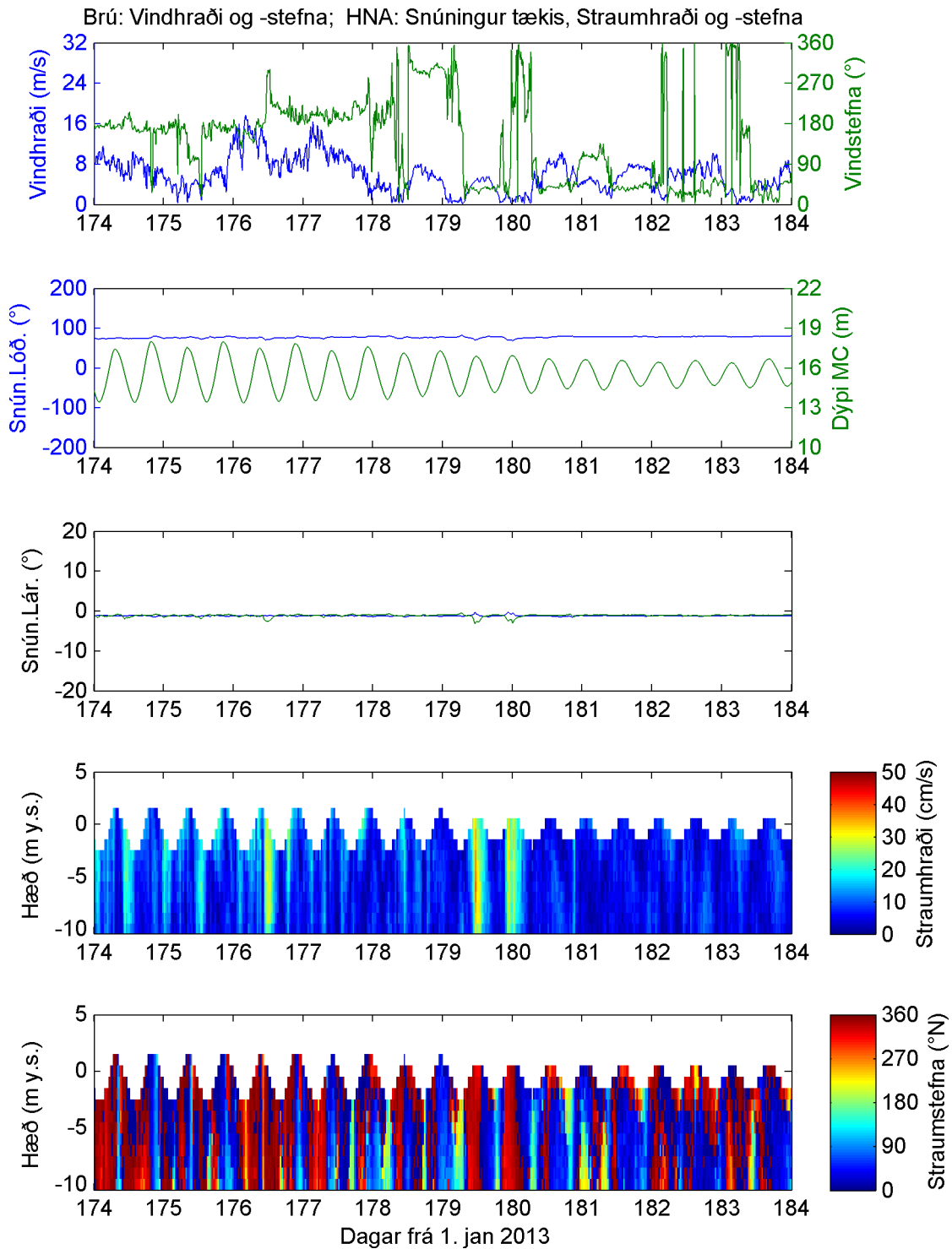
Mynd A. 12. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-05-25 til 2013-06-04.



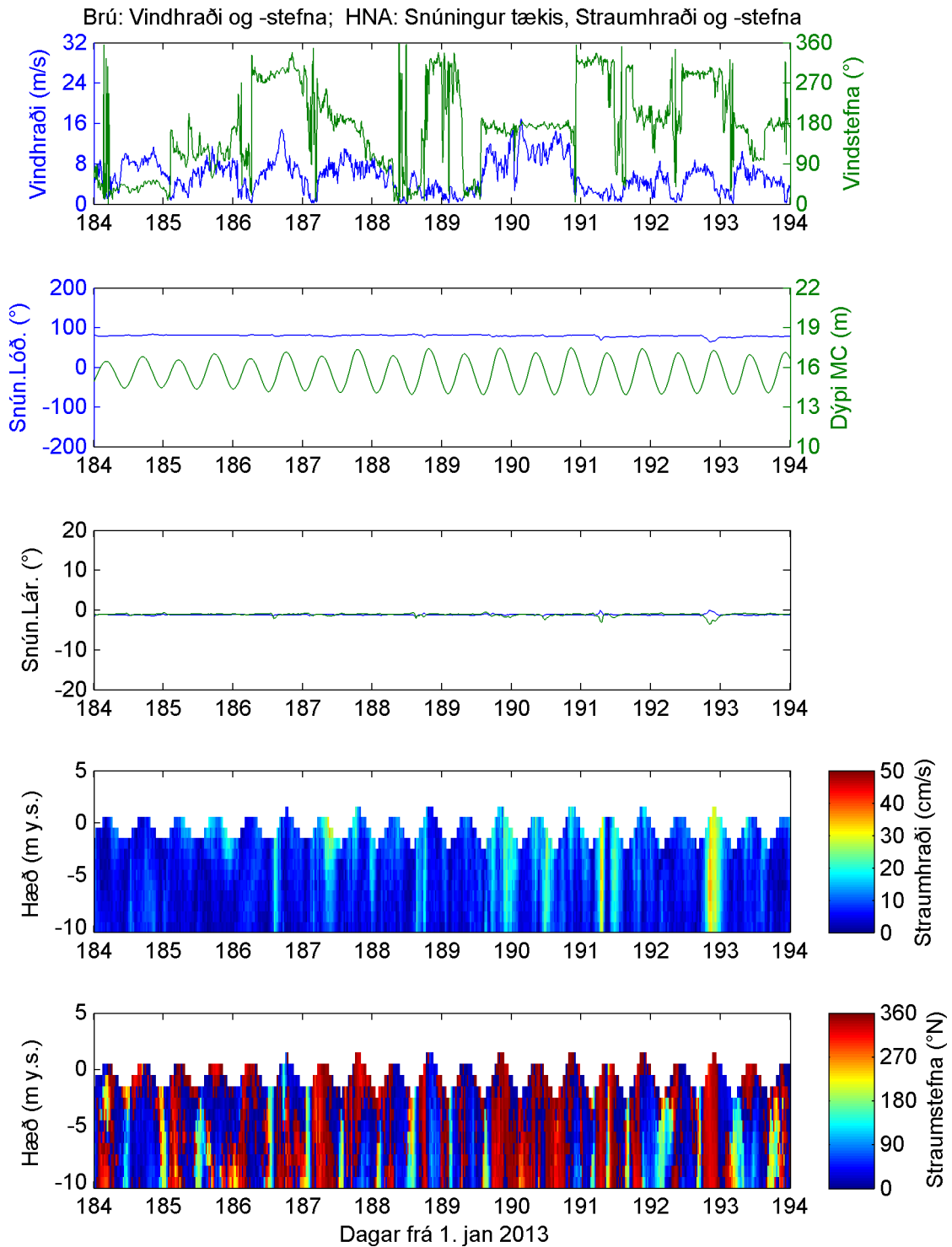
Mynd A. 13. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-06-04 til 2013-06-14.



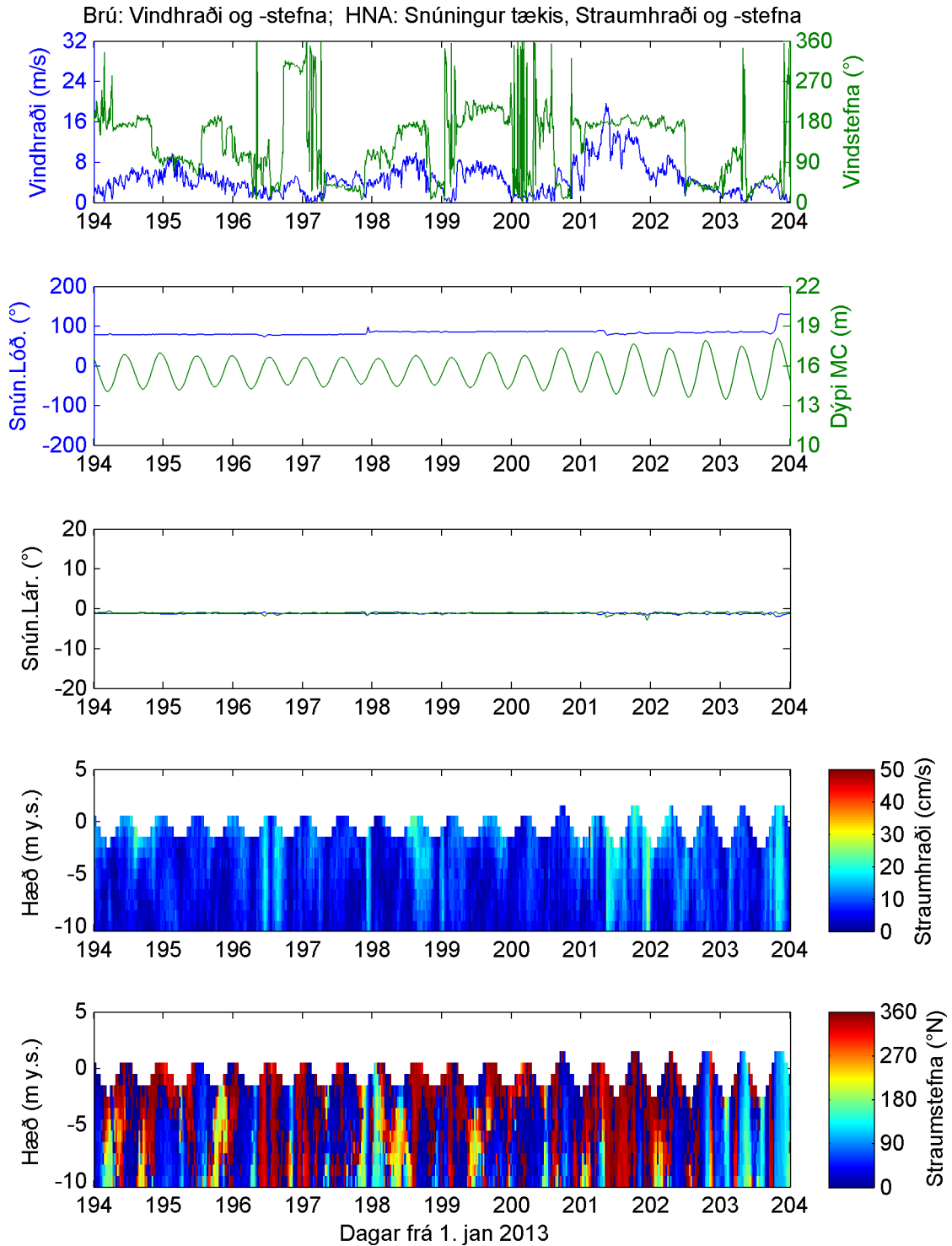
Mynd A. 14. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-06-14 til 2013-06-24.



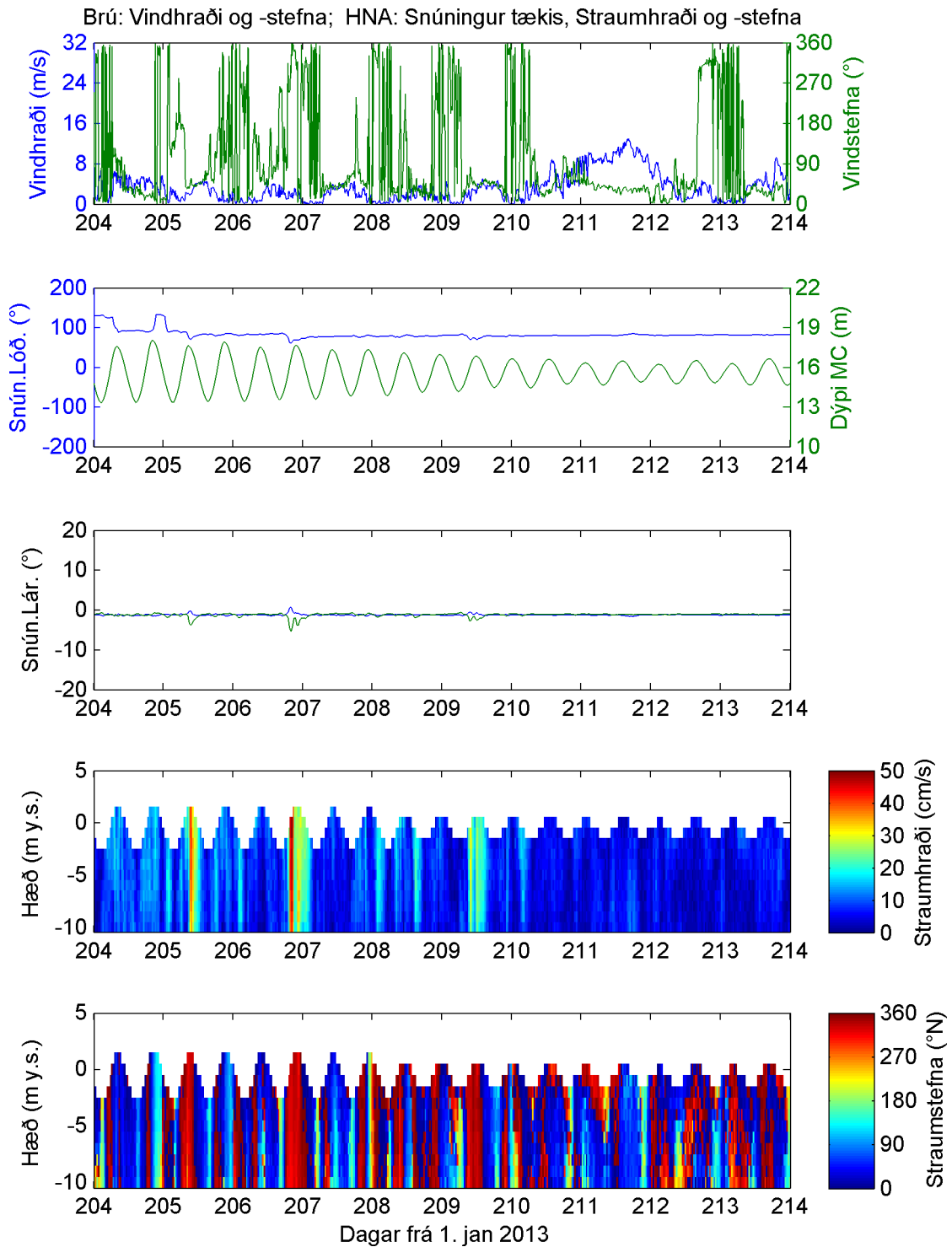
Mynd A. 15. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-06-24 til 2013-07-04.



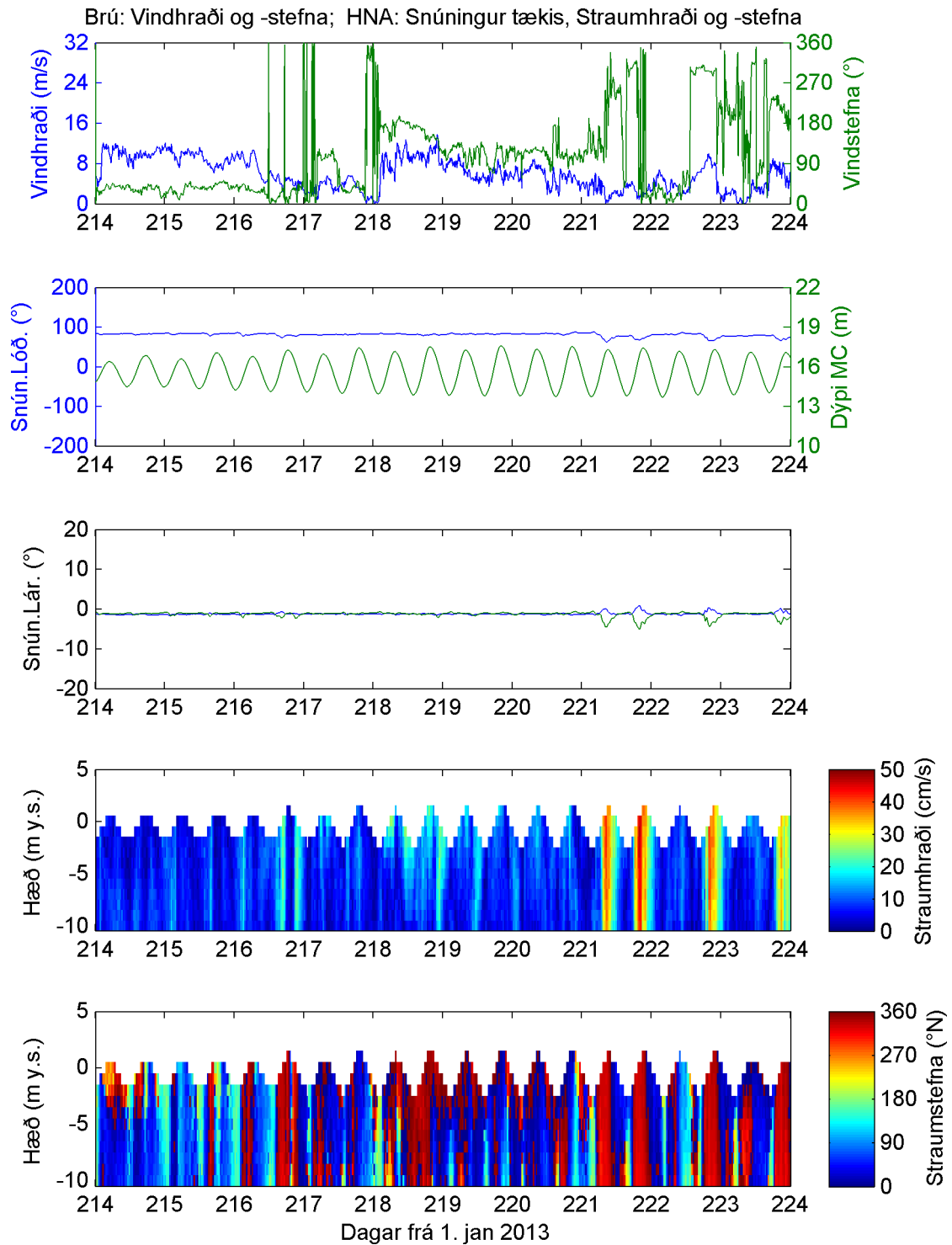
Mynd A. 16. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-07-04 til 2013-07-14.



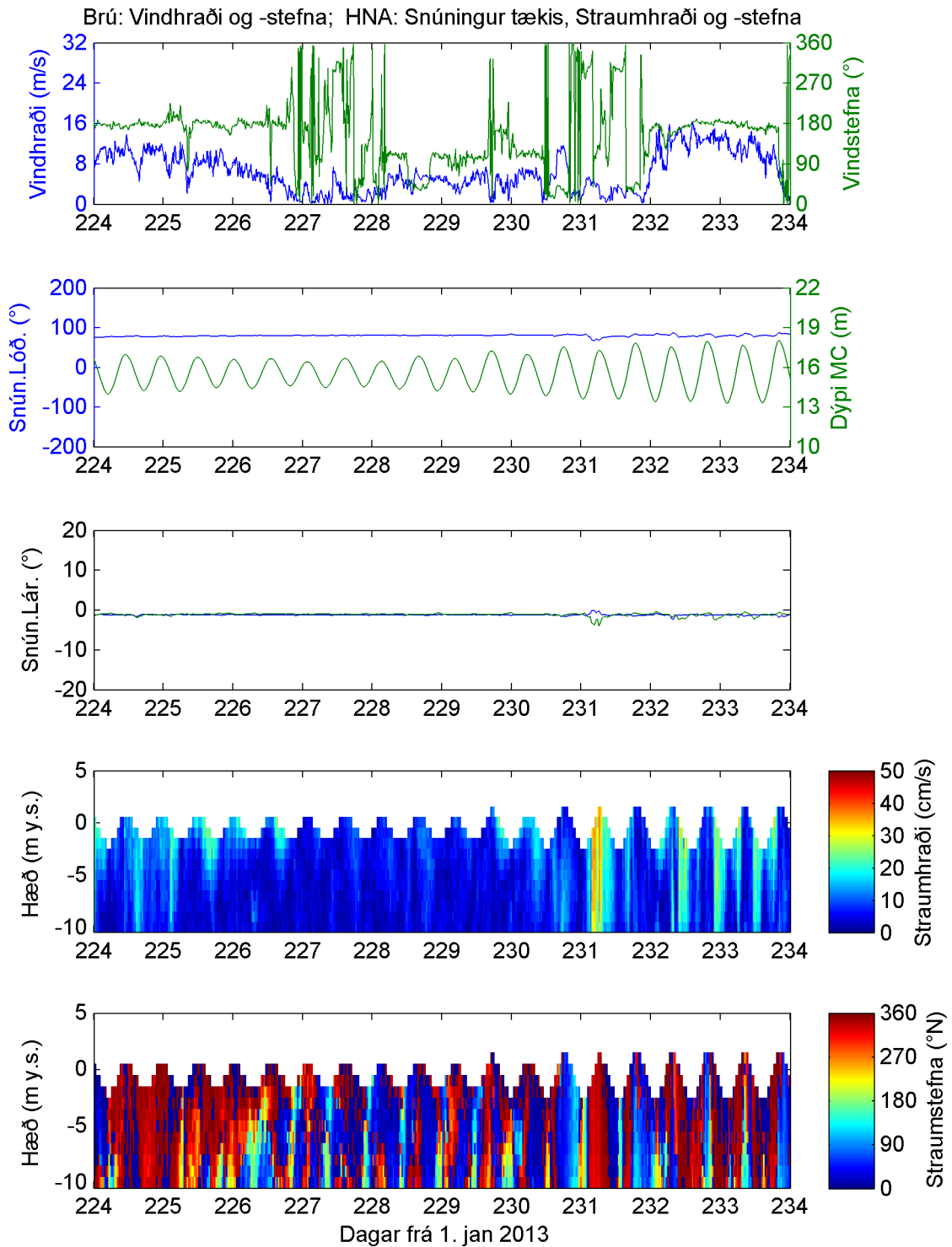
Mynd A. 17. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-07-14 til 2013-07-24.



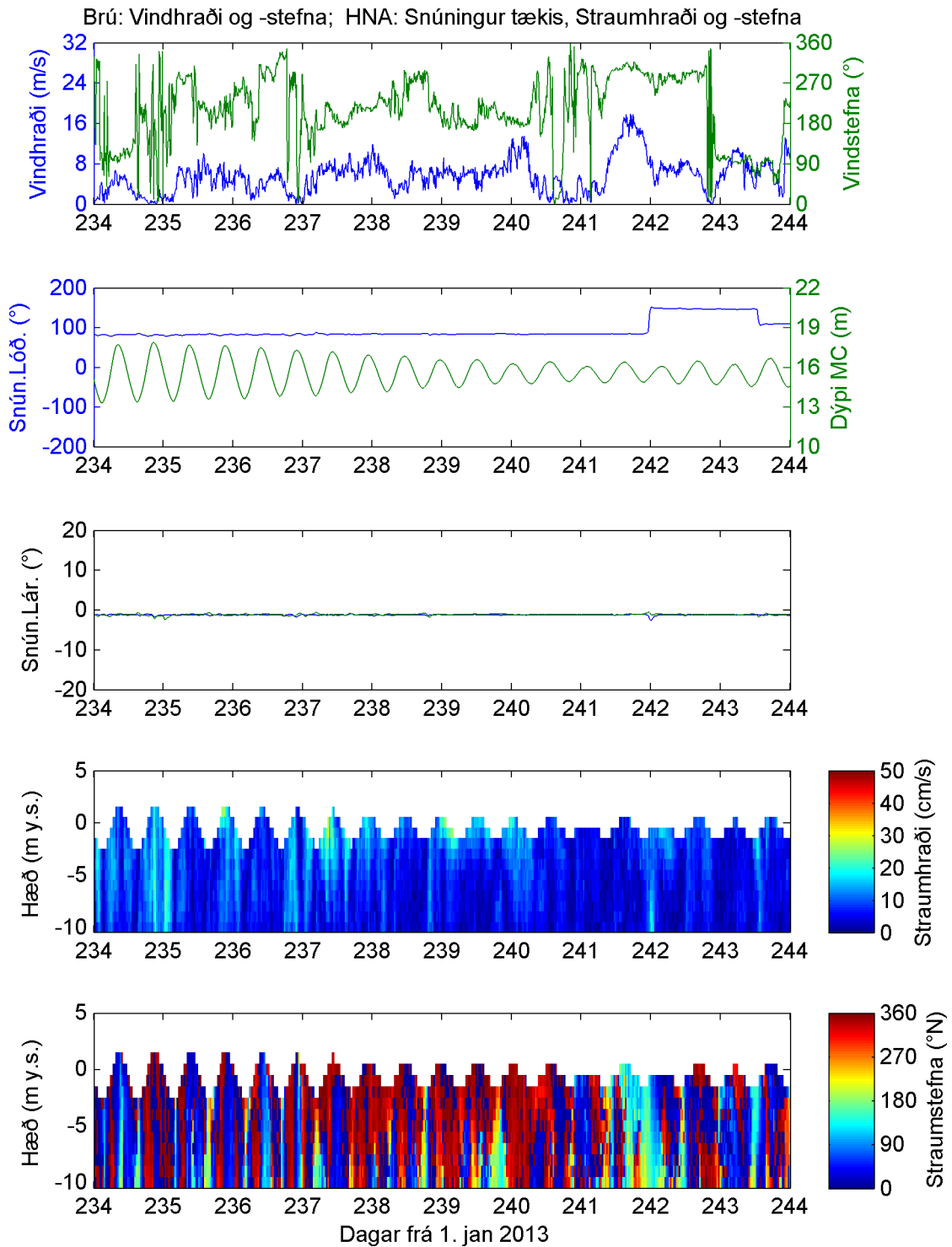
Mynd A. 18. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-07-24 til 2013-08-03.



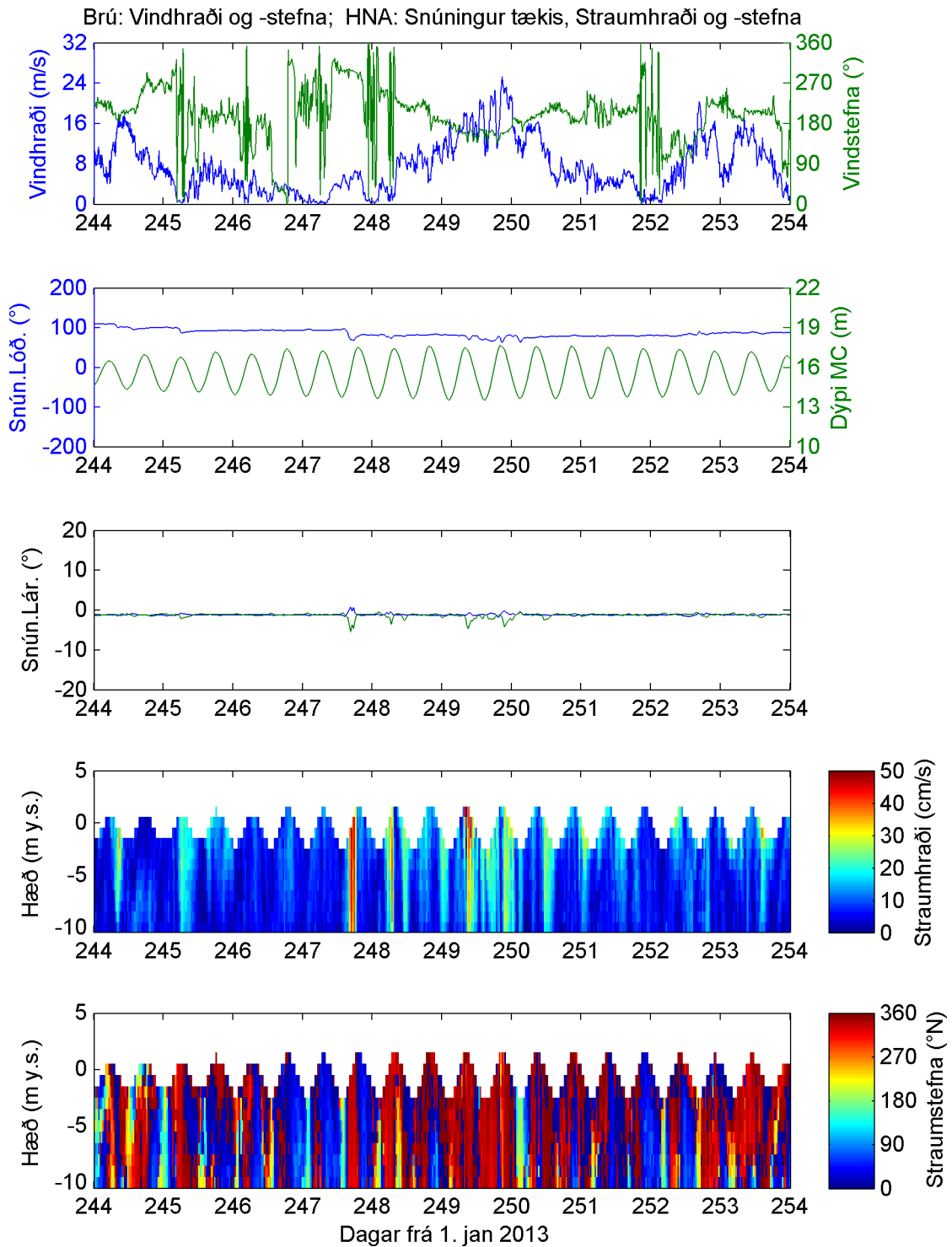
Mynd A. 19. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-08-03 til 2013-08-13.



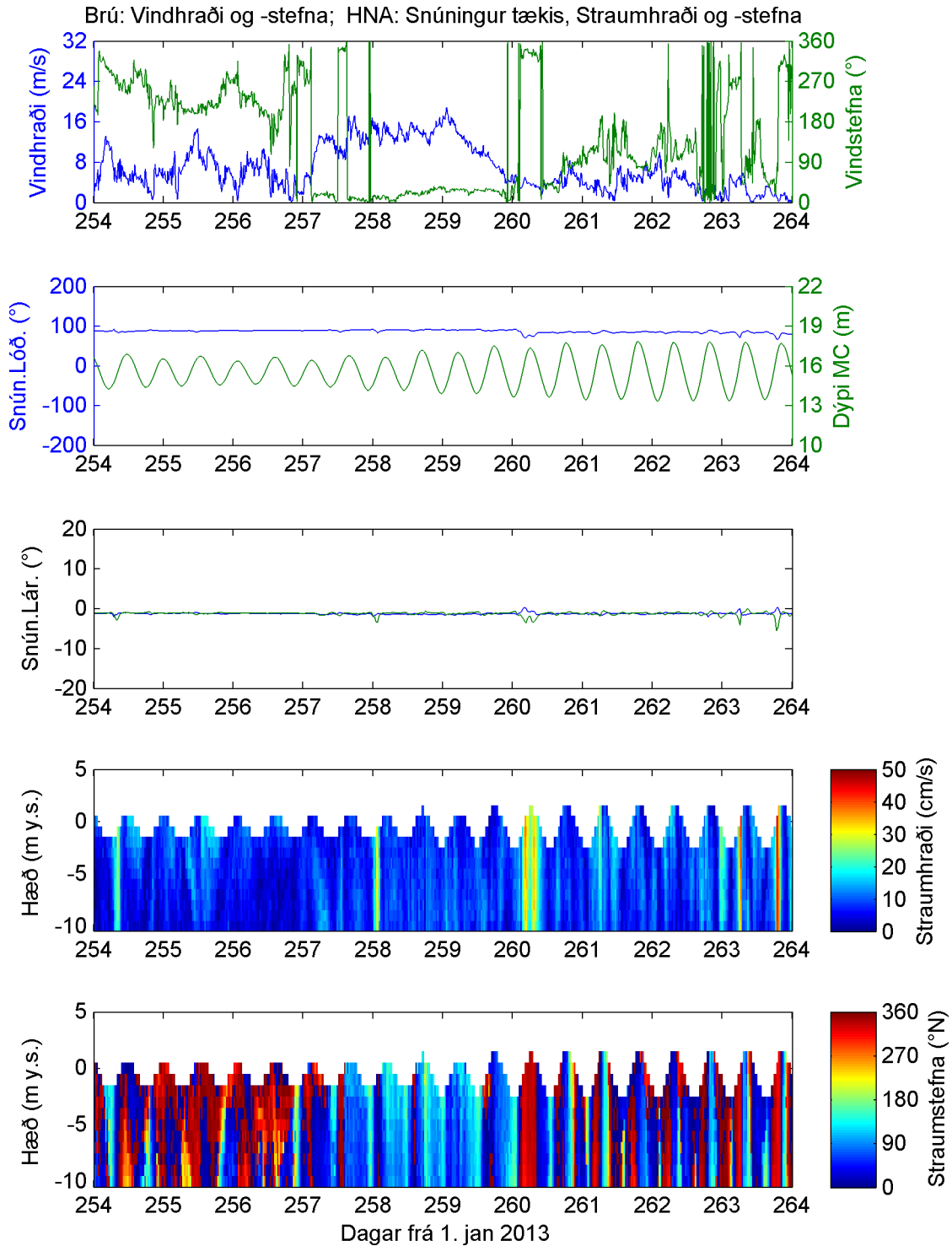
Mynd A. 20. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-08-13 til 2013-08-23.



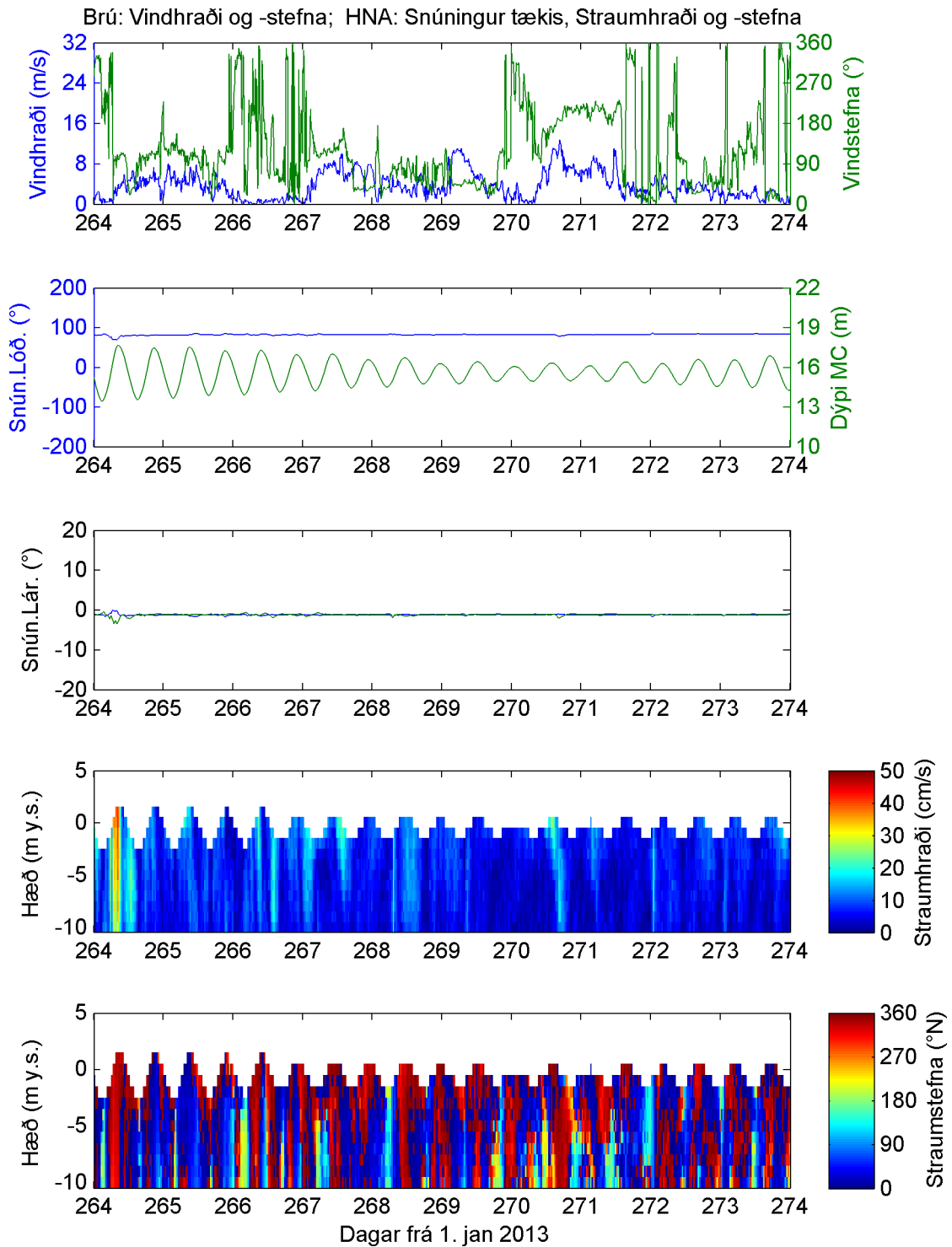
Mynd A. 21. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-08-23 til 2013-09-02.



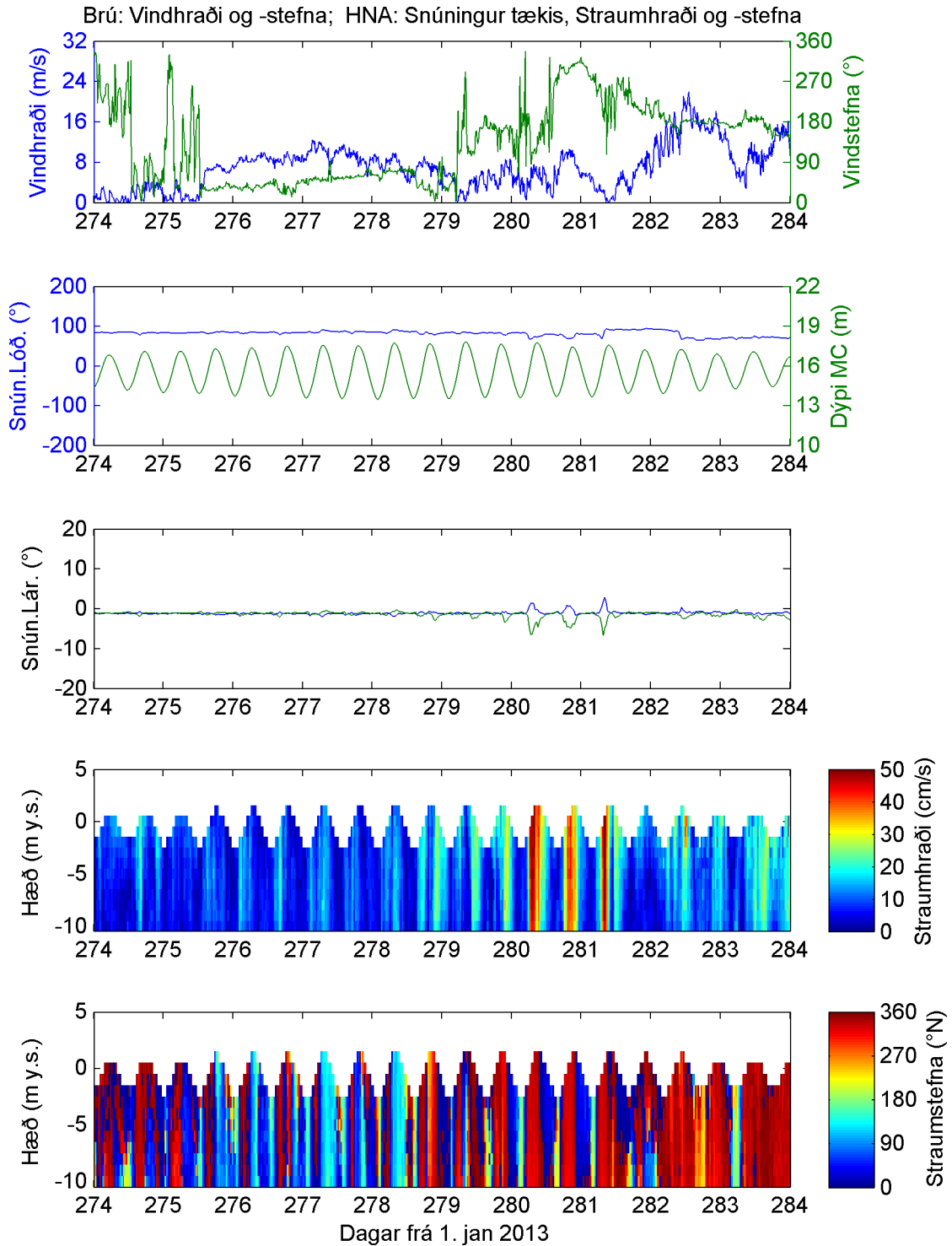
Mynd A. 22. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-09-02 til 2013-09-12.



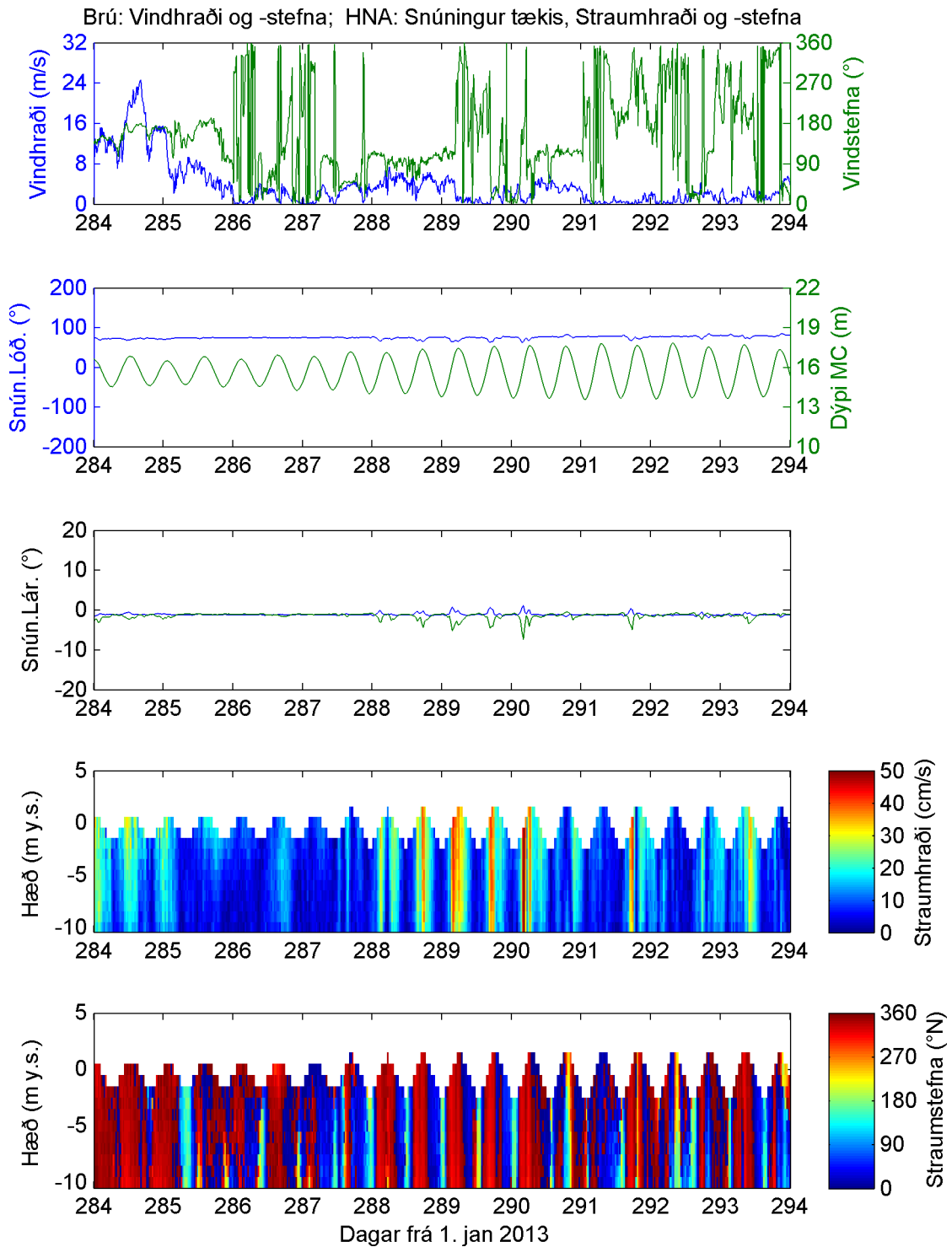
Mynd A. 23. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-09-12 til 2013-09-22.



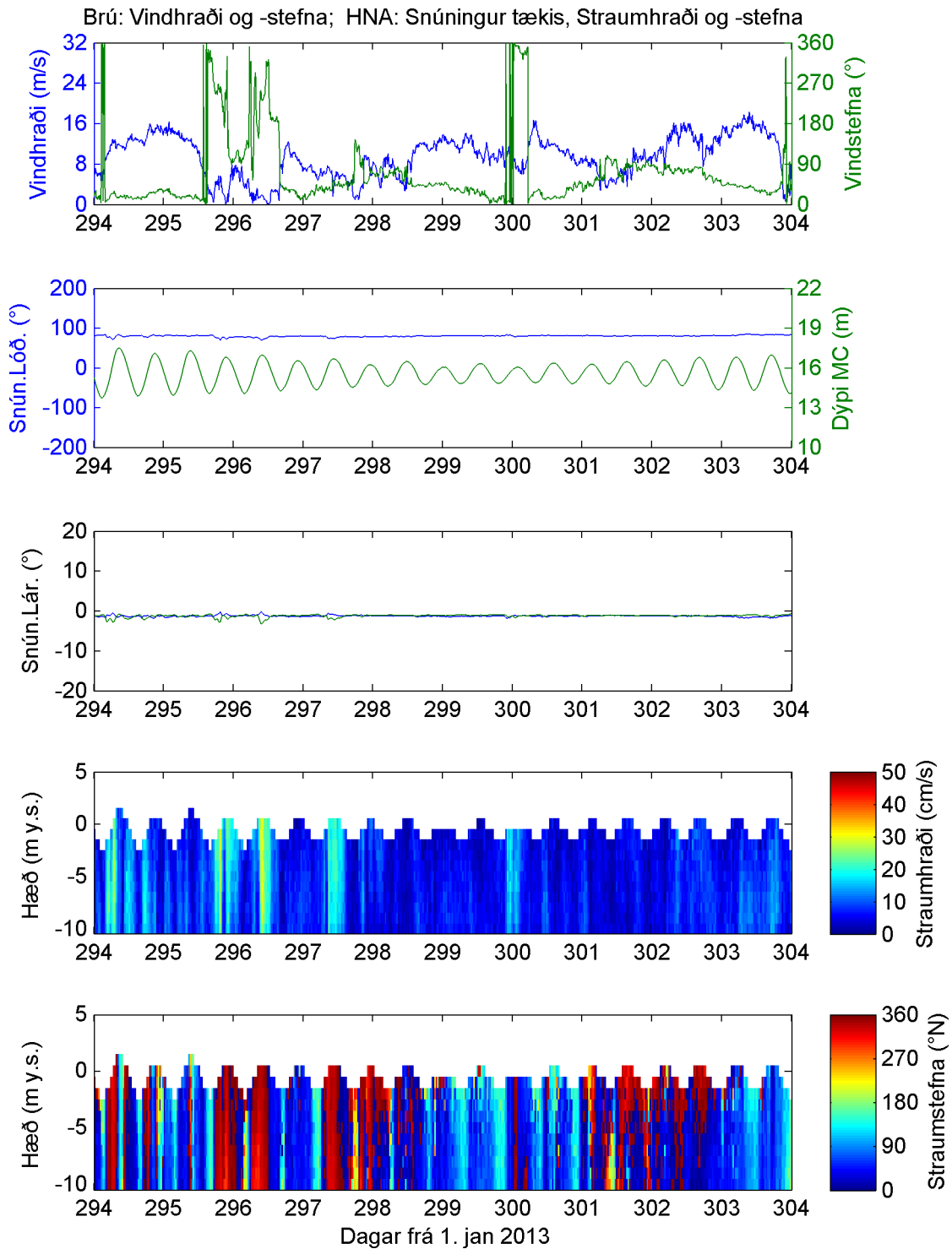
Mynd A. 24. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-09-22 til 2013-10-02.



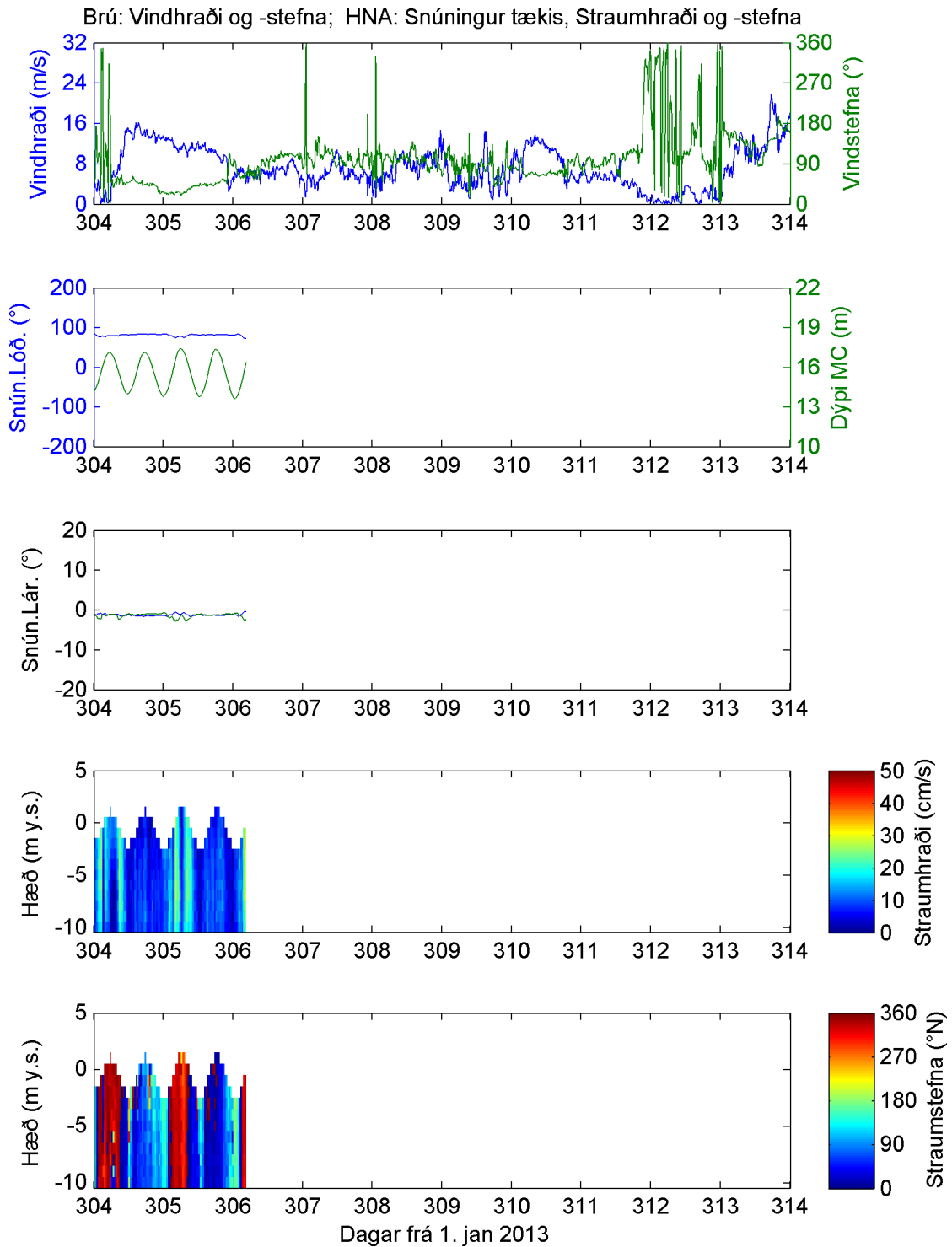
Mynd A. 25. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-10-02 til 2013-10-12.



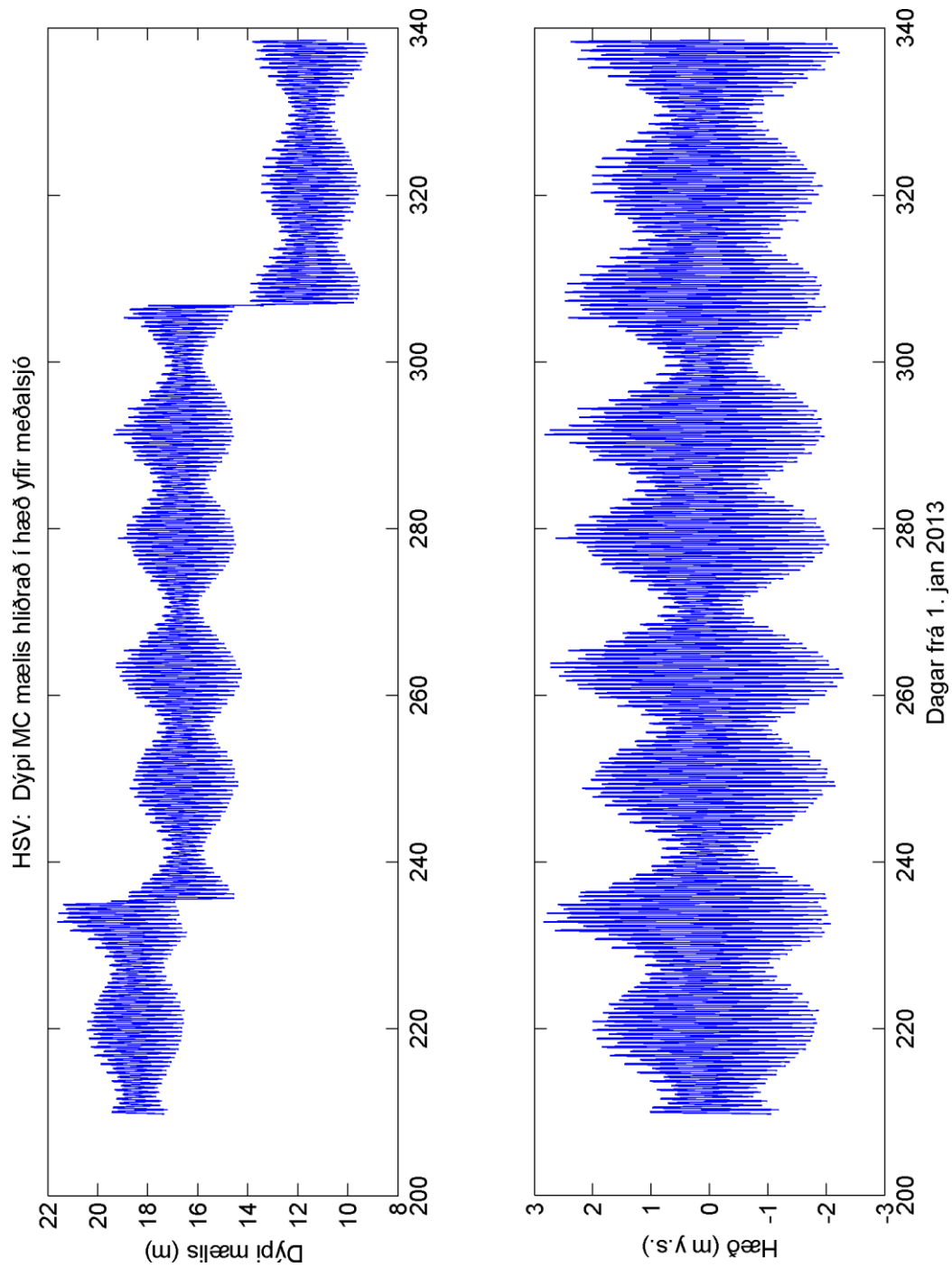
Mynd A. 26. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-10-12 til 2013-10-22.



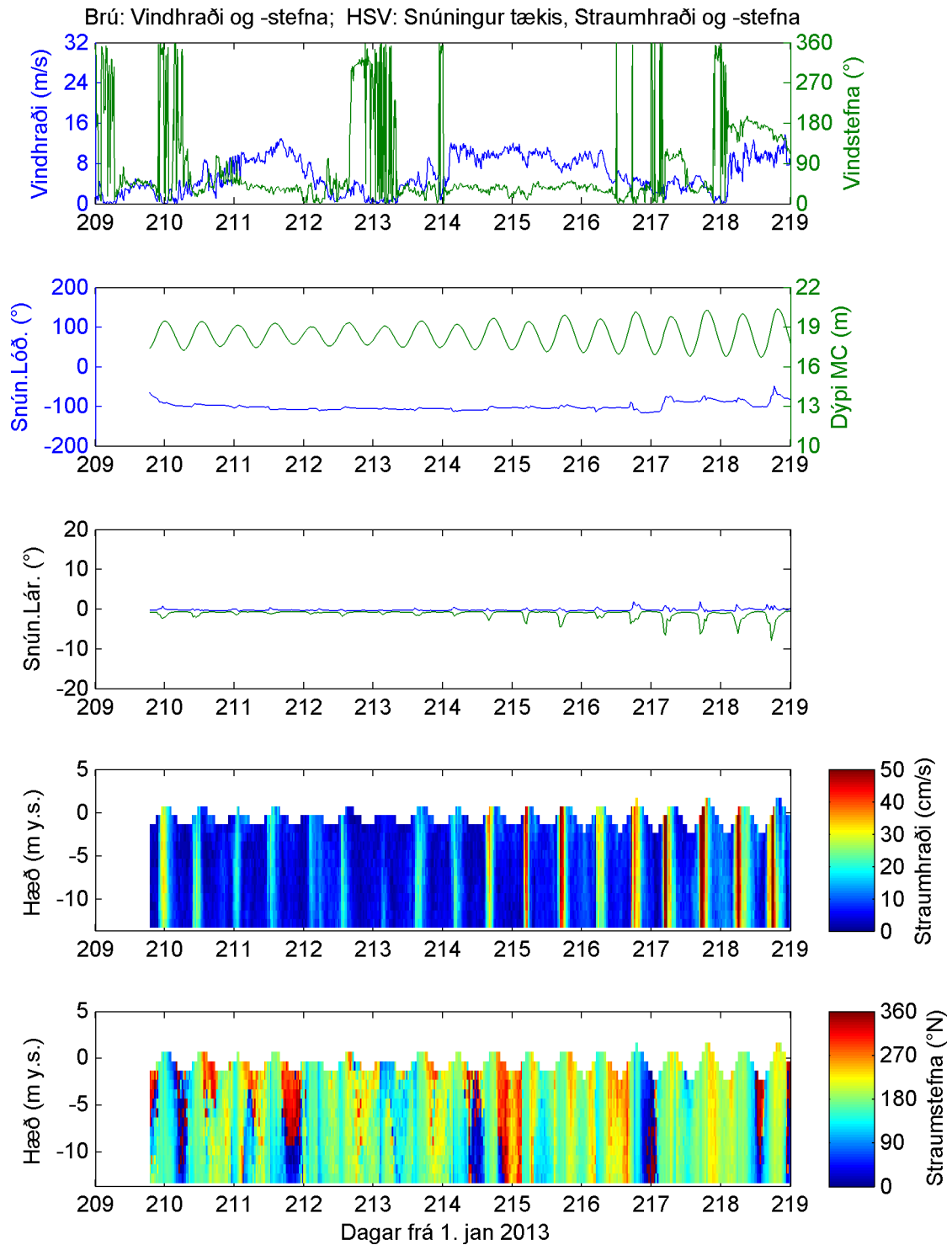
Mynd A. 27. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-10-22 til 2013-11-01.



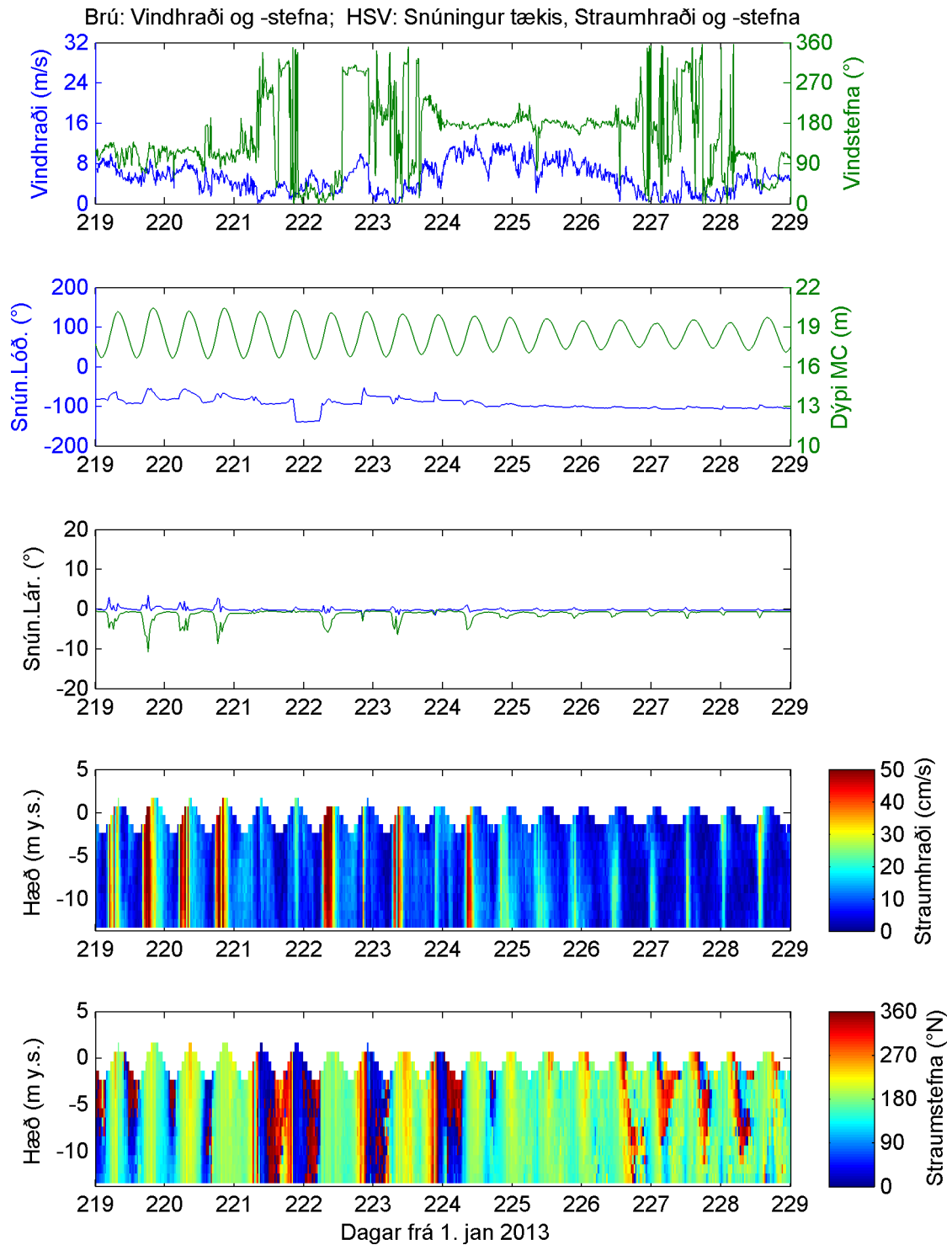
Mynd A. 28. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HNA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-11-01 til 2013-11-11.



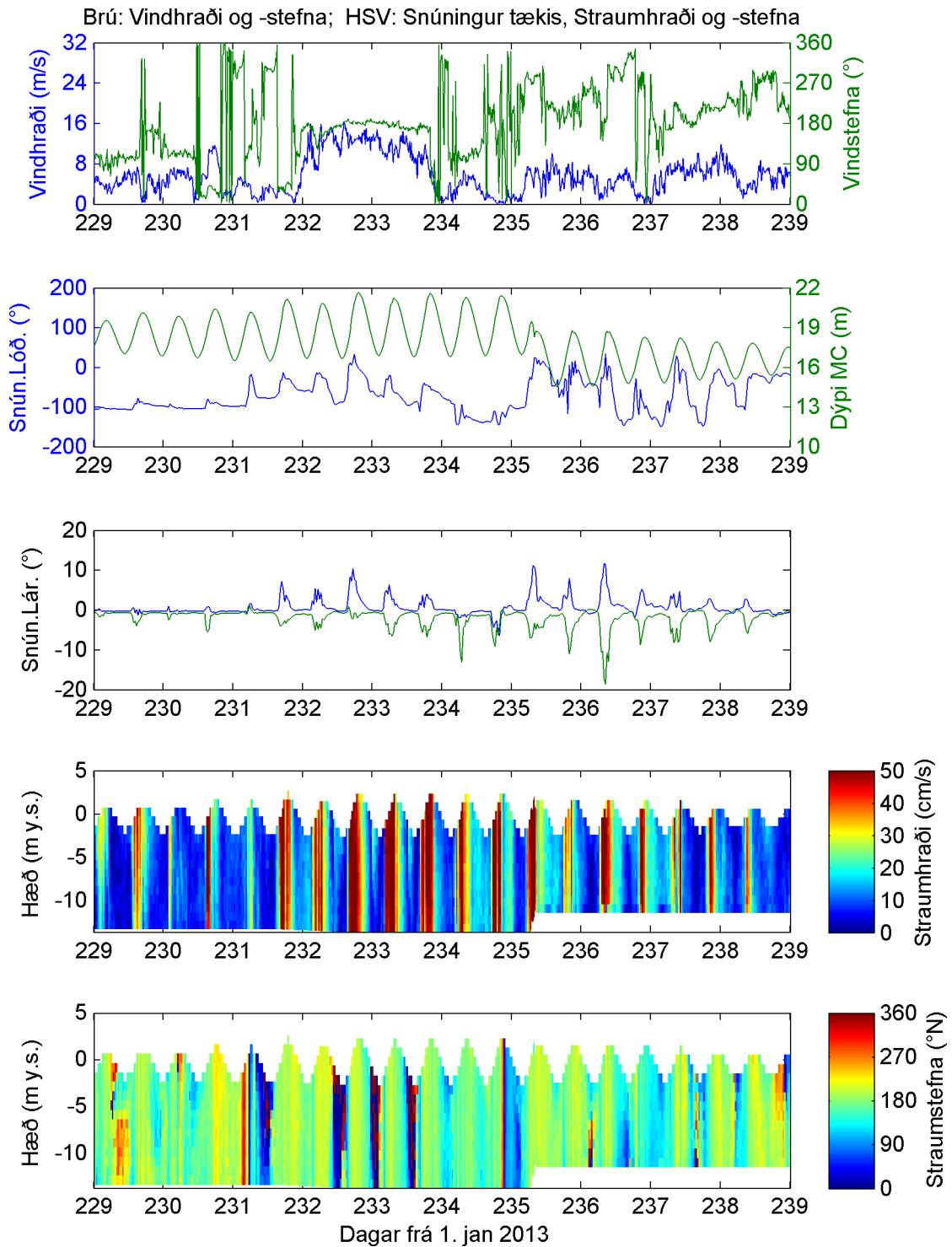
Mynd A. 29. Dýpi MicroCAT mælis á lögn HSV út frá mældum þrýstingi, hita og seltu (efra graf) fært yfir í hæð yfir meðalsjó (neðra graf). 2013-07-20 til 2013-12-07.



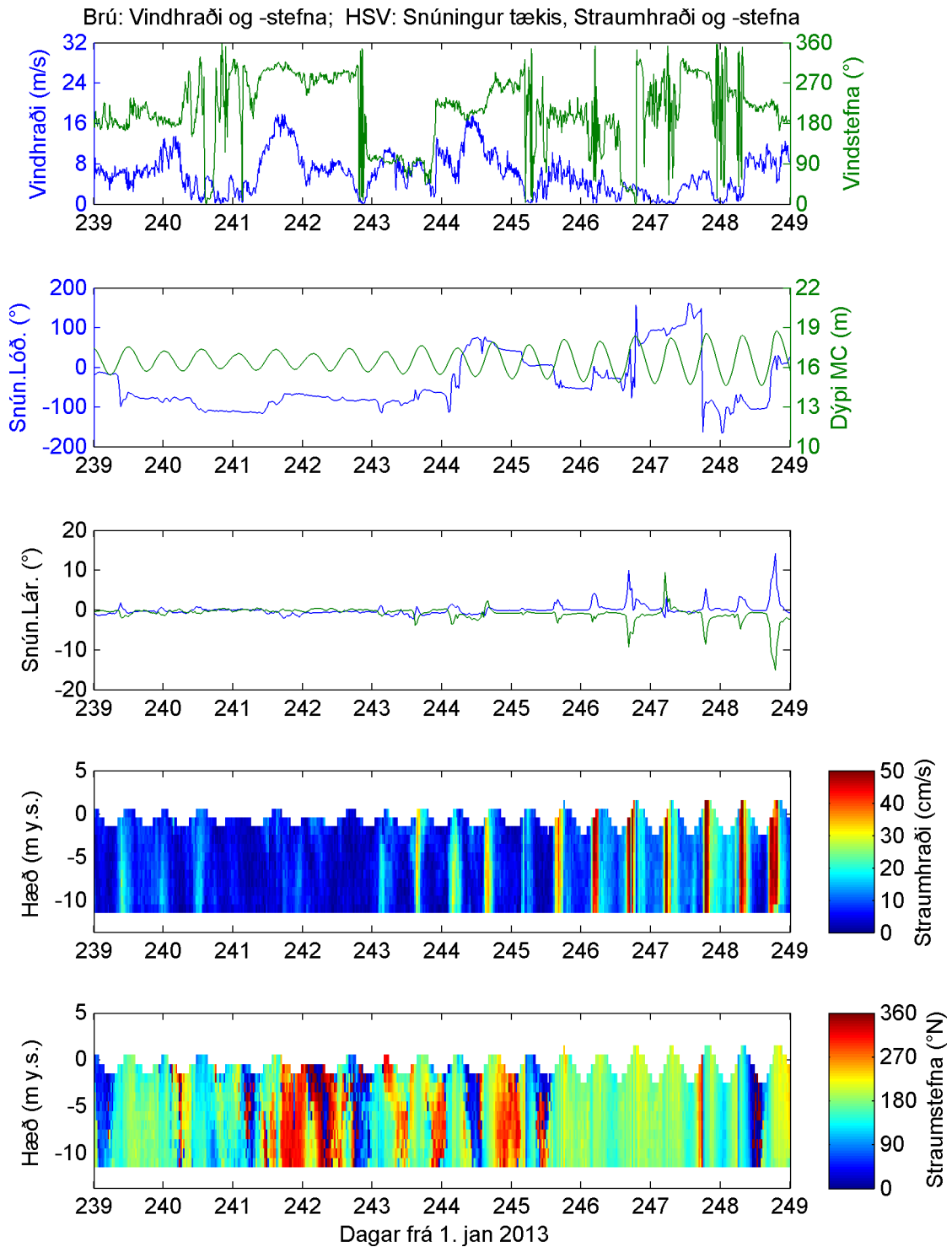
Mynd A. 30. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HSV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-07-29 til 2013-08-08.



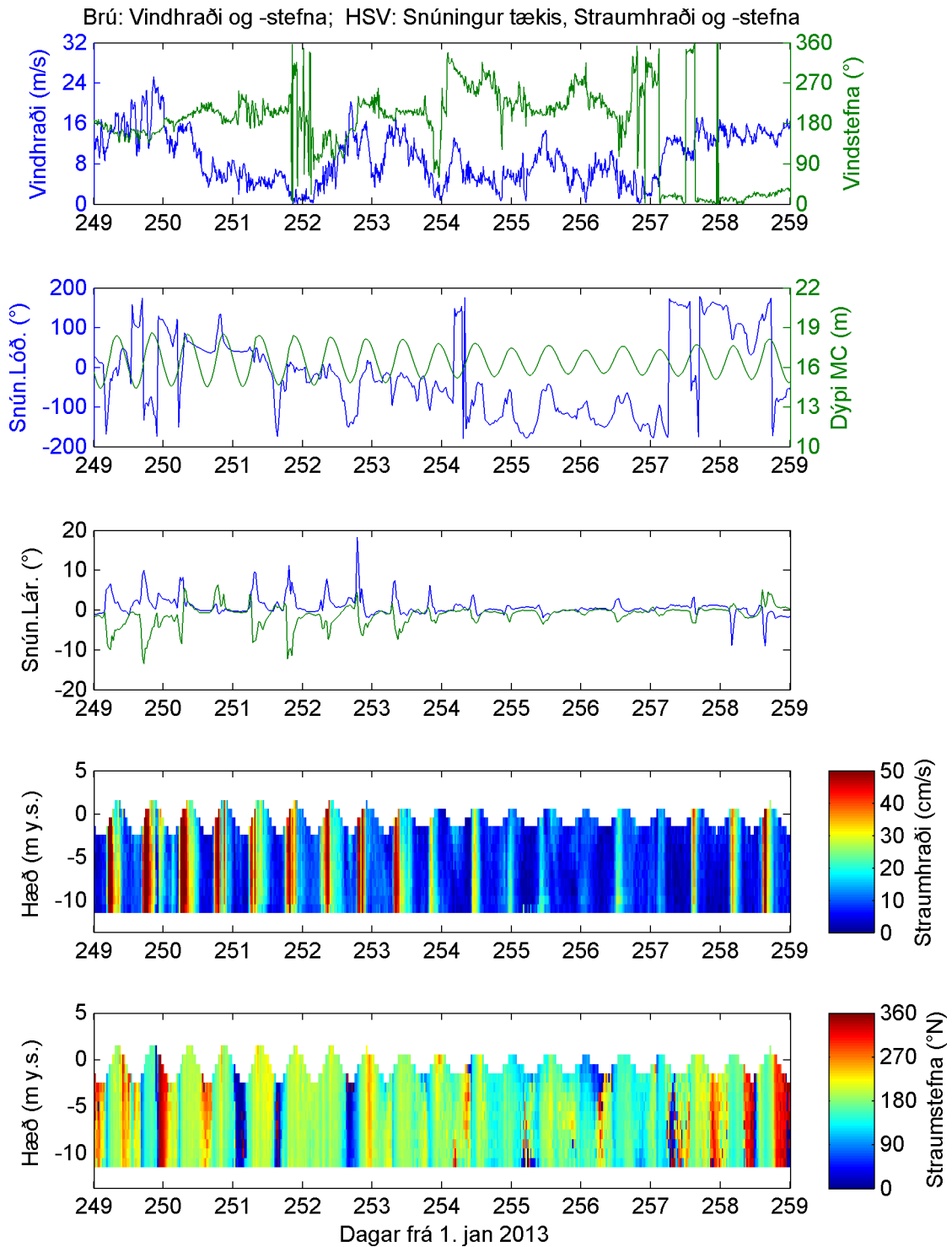
Mynd A. 31. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HSV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-08-08 til 2013-08-18.



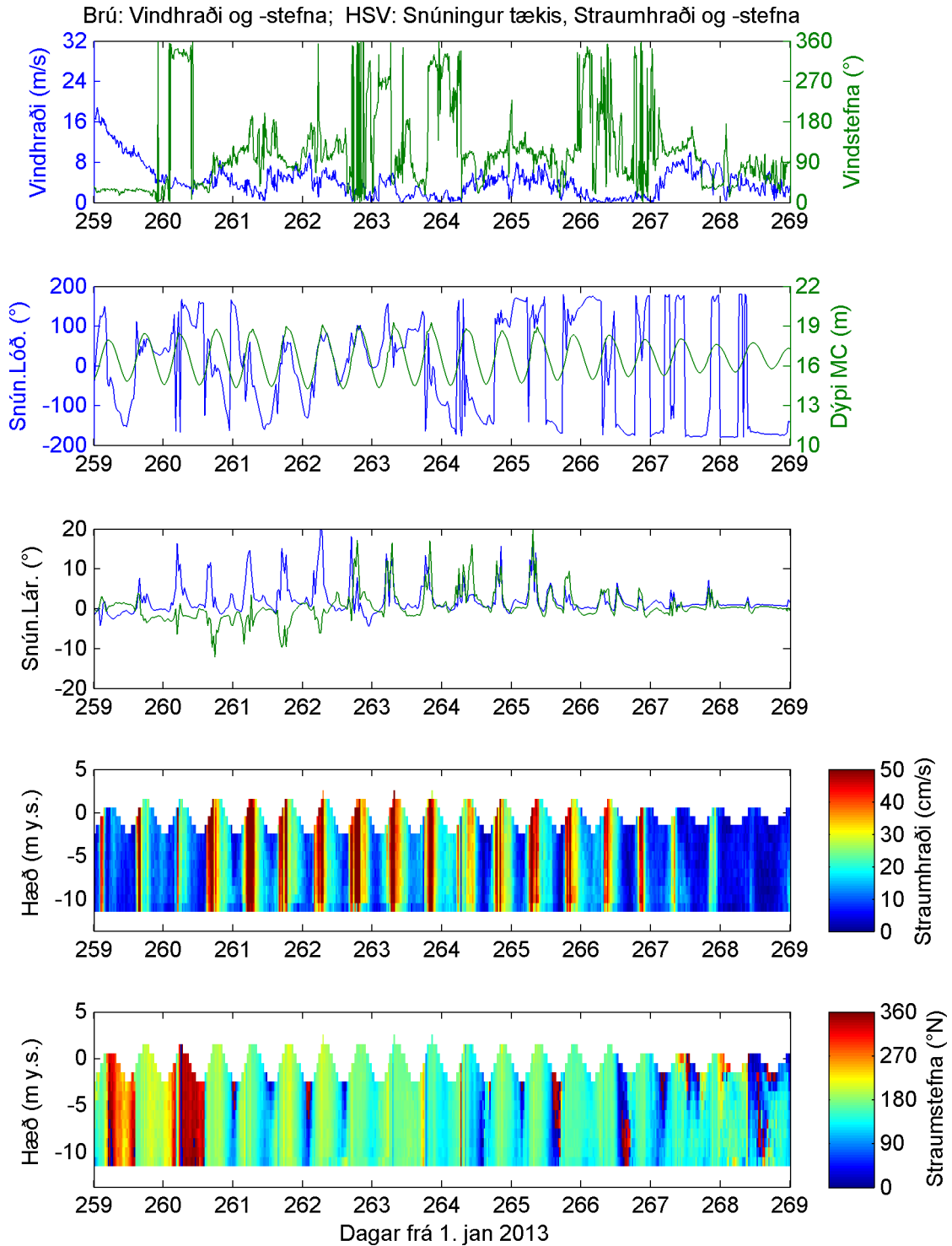
Mynd A. 32. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HSV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-08-18 til 2013-08-28.



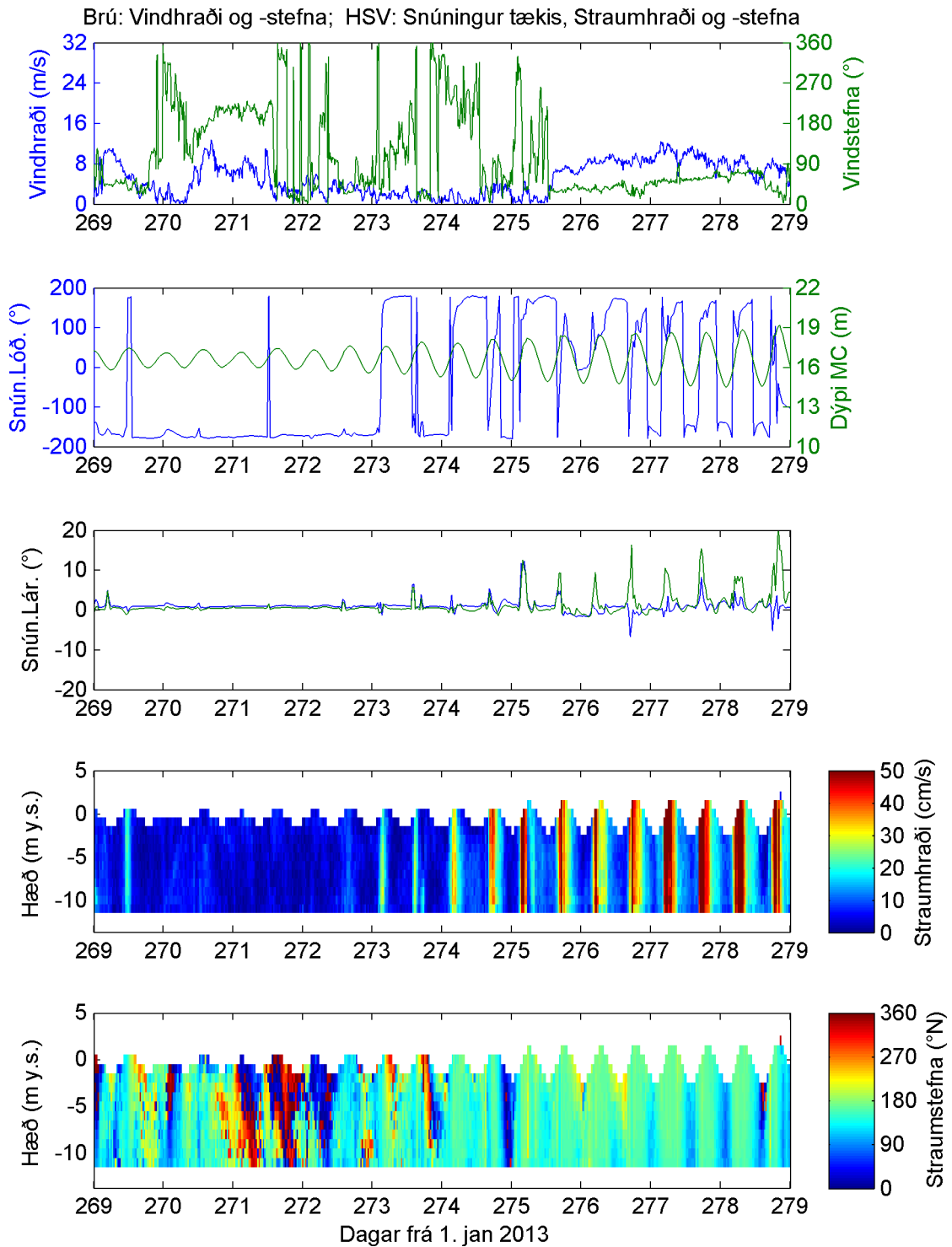
Mynd A. 33. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumshá HSV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-08-28 til 2013-09-07.



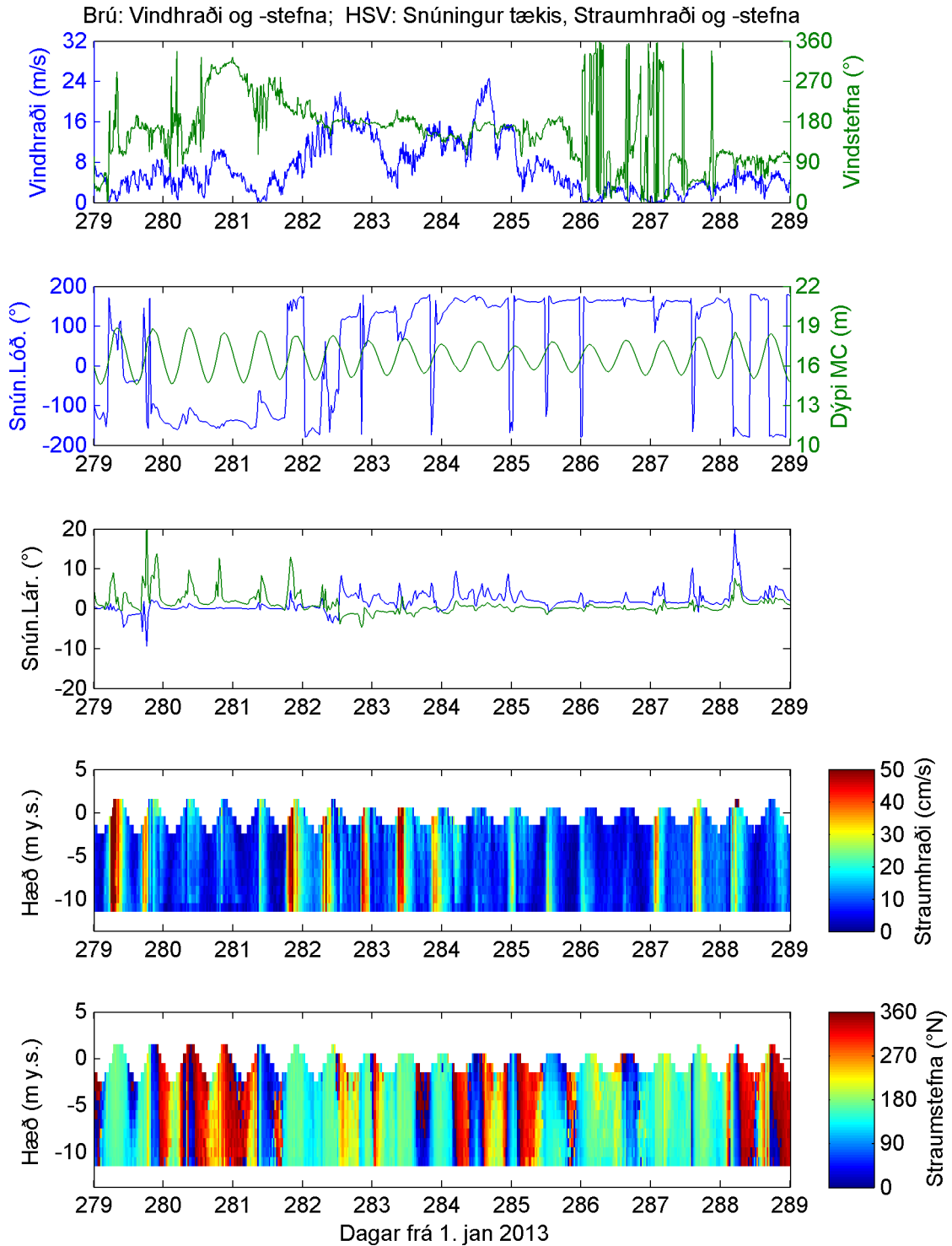
Mynd A. 34. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HSV: snúningur tækis og dýpi tilsvareandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-09-07 til 2013-09-17.



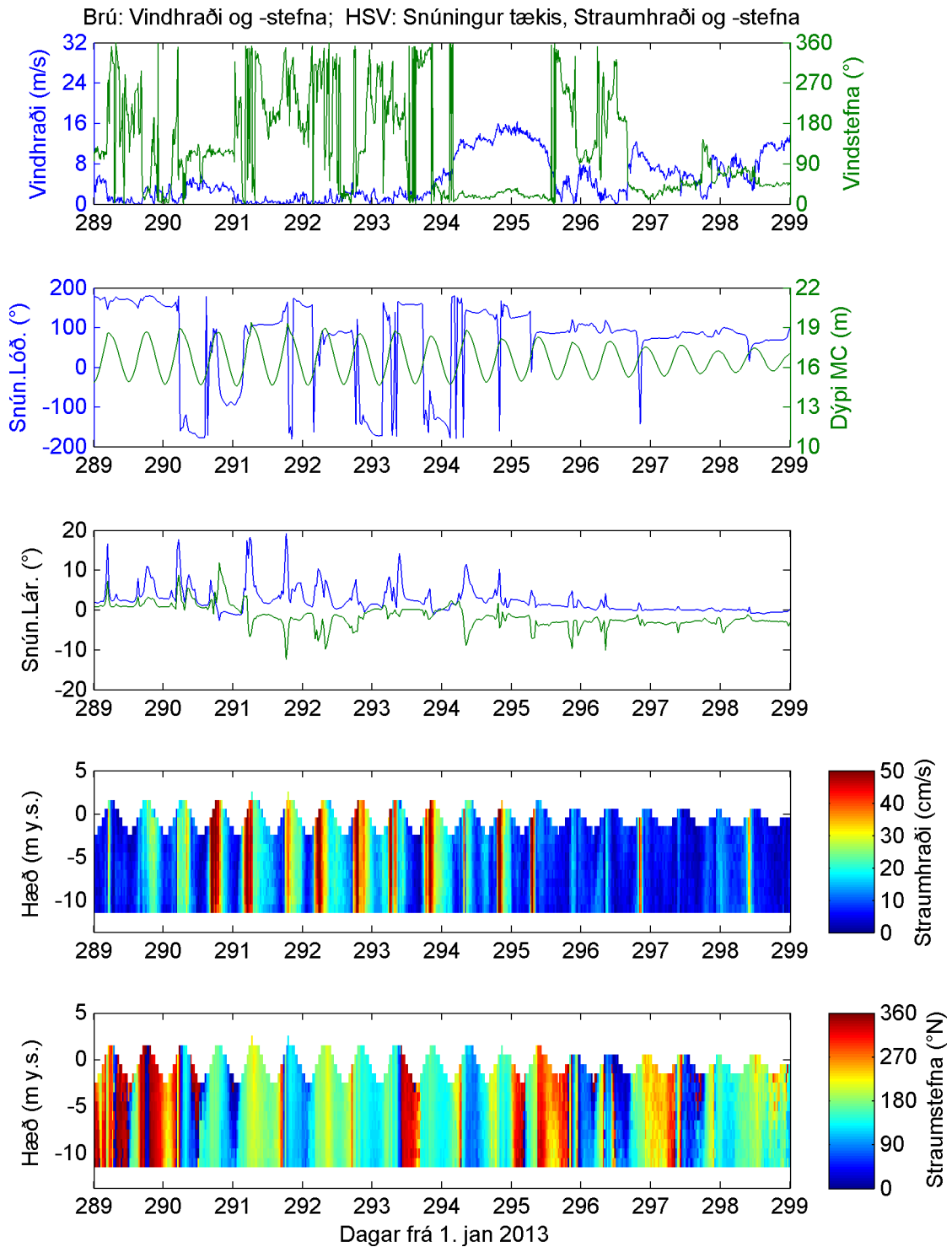
Mynd A. 35. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HSV: snúningur tækis og dýpi tilsvareandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-09-17 til 2013-09-27.



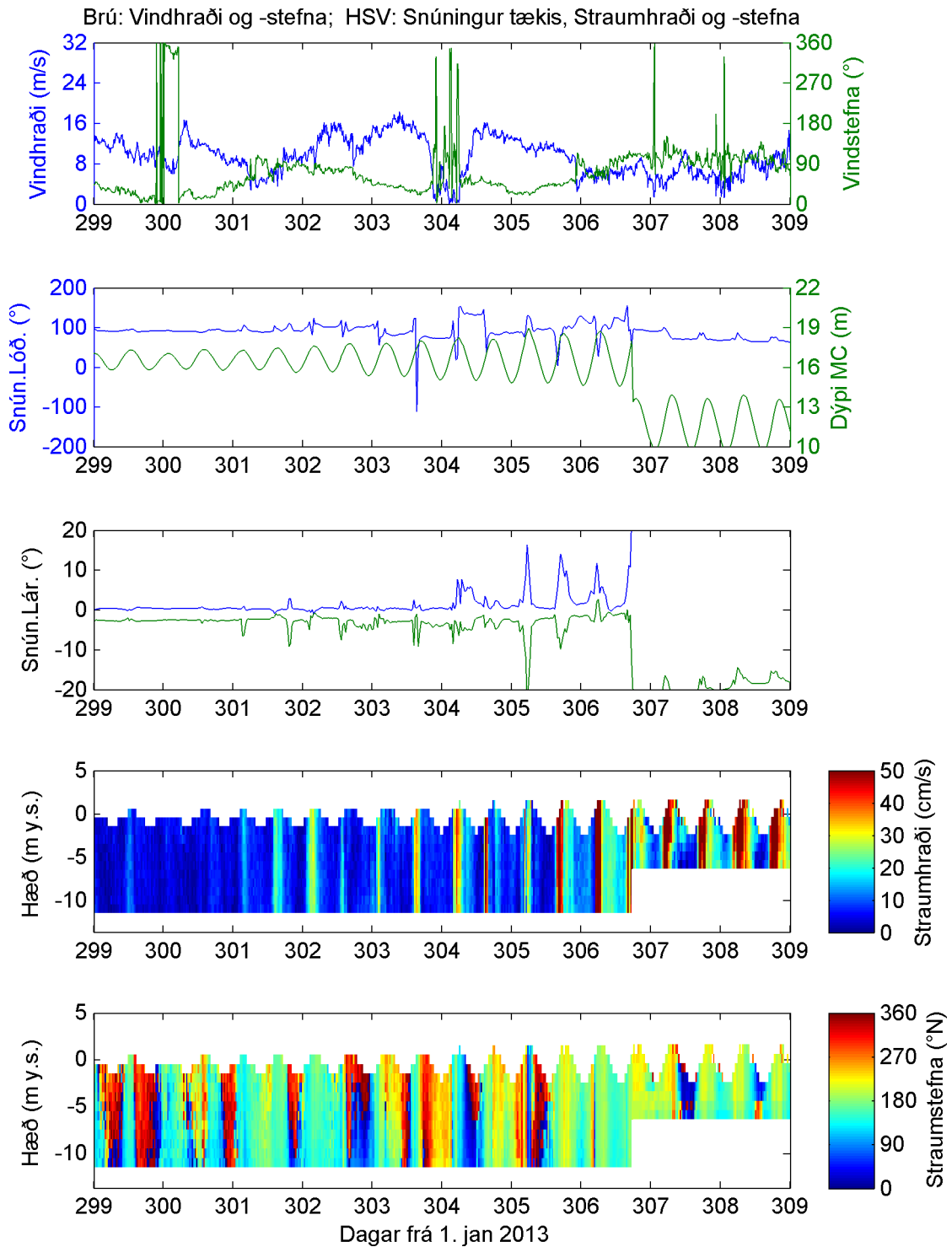
Mynd A. 36. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HSV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-09-27 til 2013-10-07.



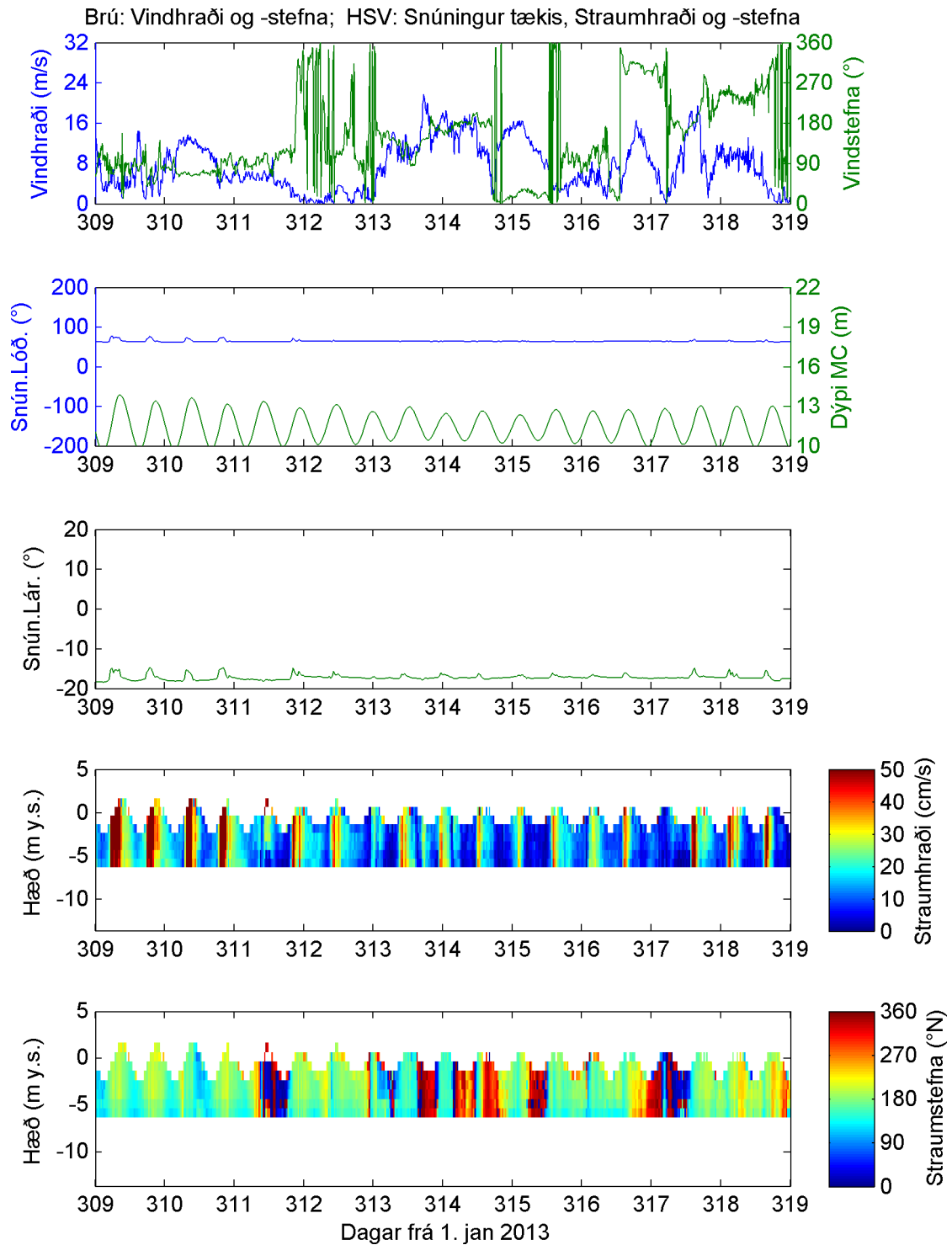
Mynd A. 37. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HSV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-10-07 til 2013-10-17.



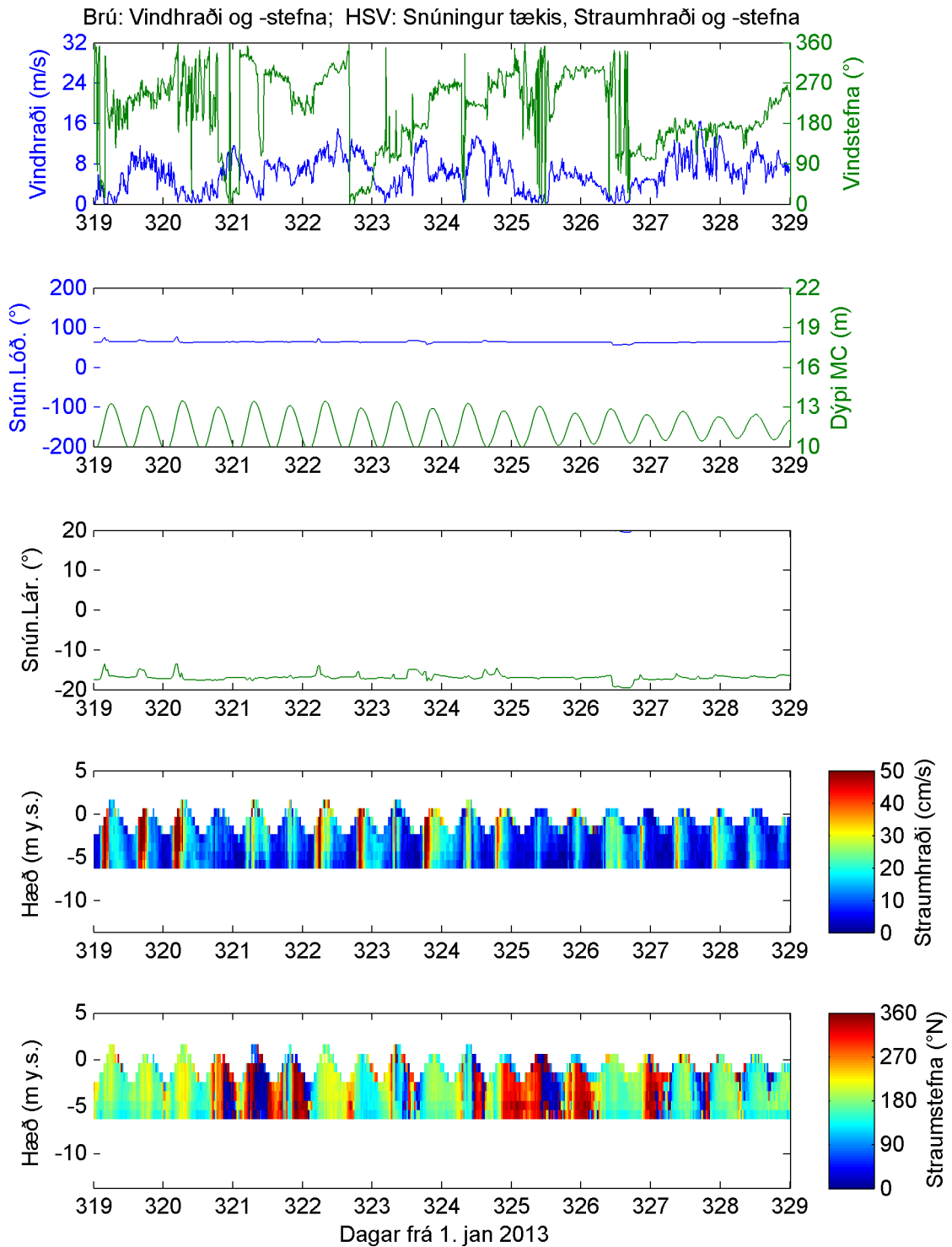
Mynd A. 38. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HSV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-10-17 til 2013-10-27.



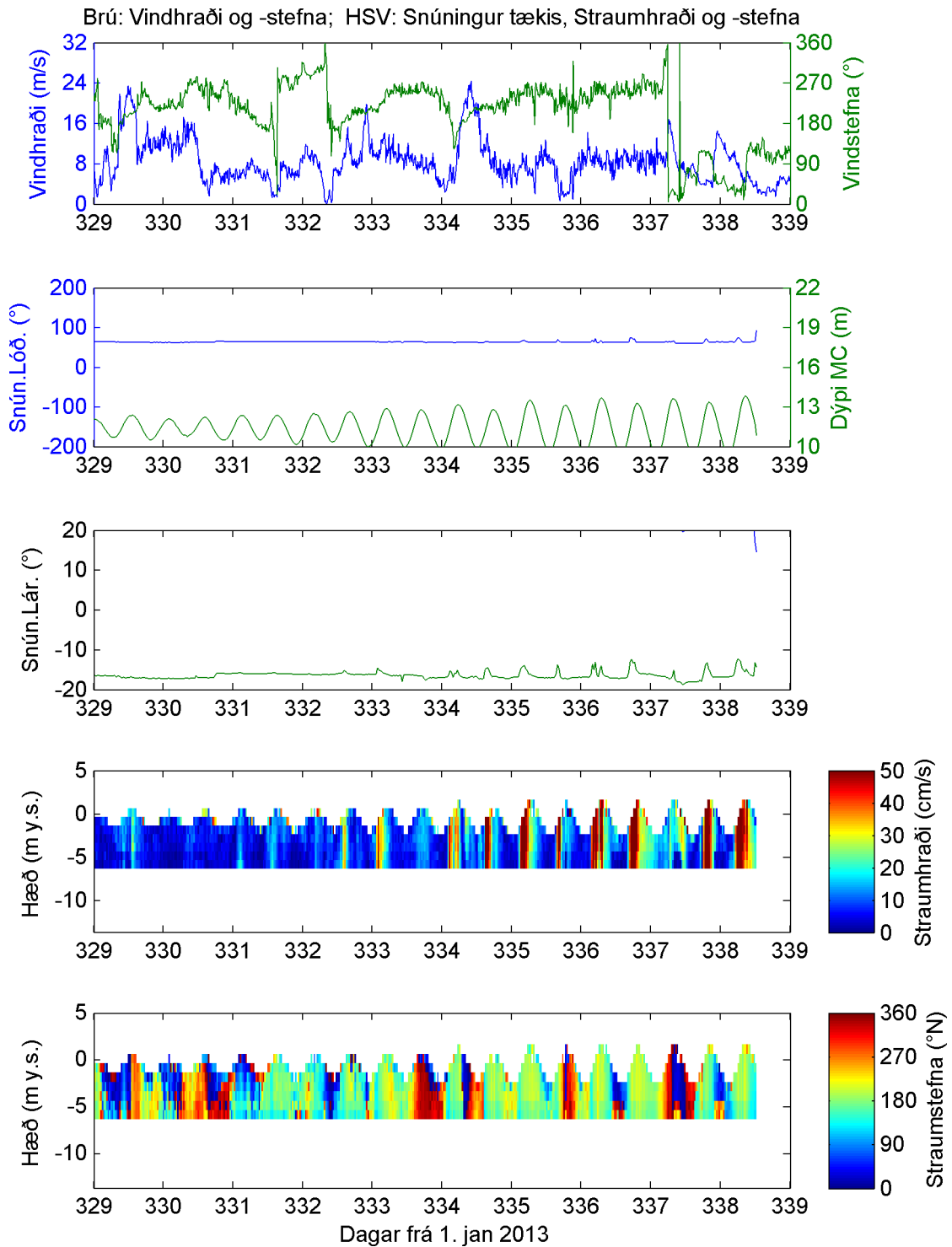
Mynd A. 39. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HSV: snúningur tækis og dýpi tilsvareandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-10-27 til 2013-11-06.



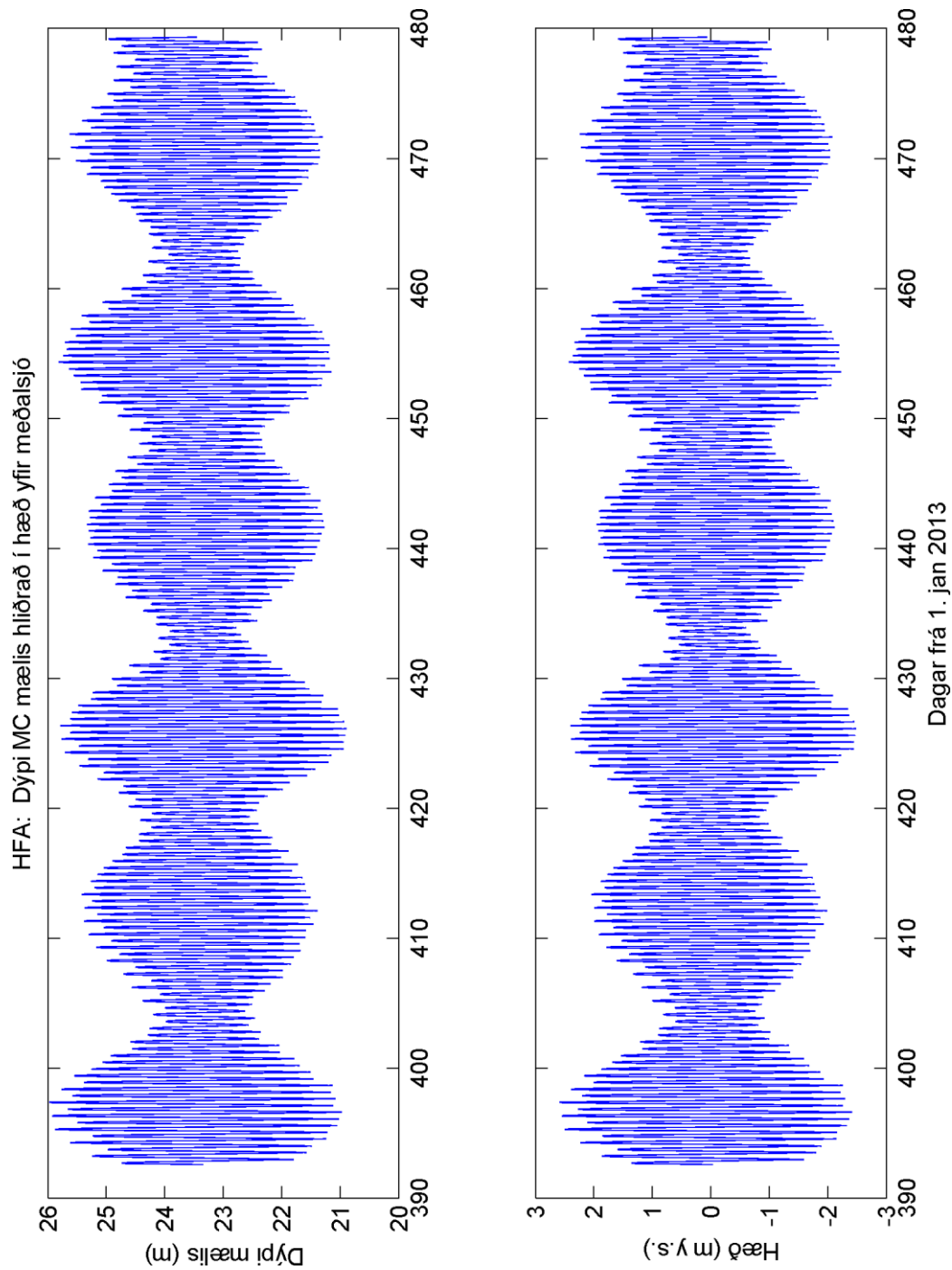
Mynd A. 40. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HSV: snúningur tækis og dýpi tilsvareandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-11-06 til 2013-11-16.



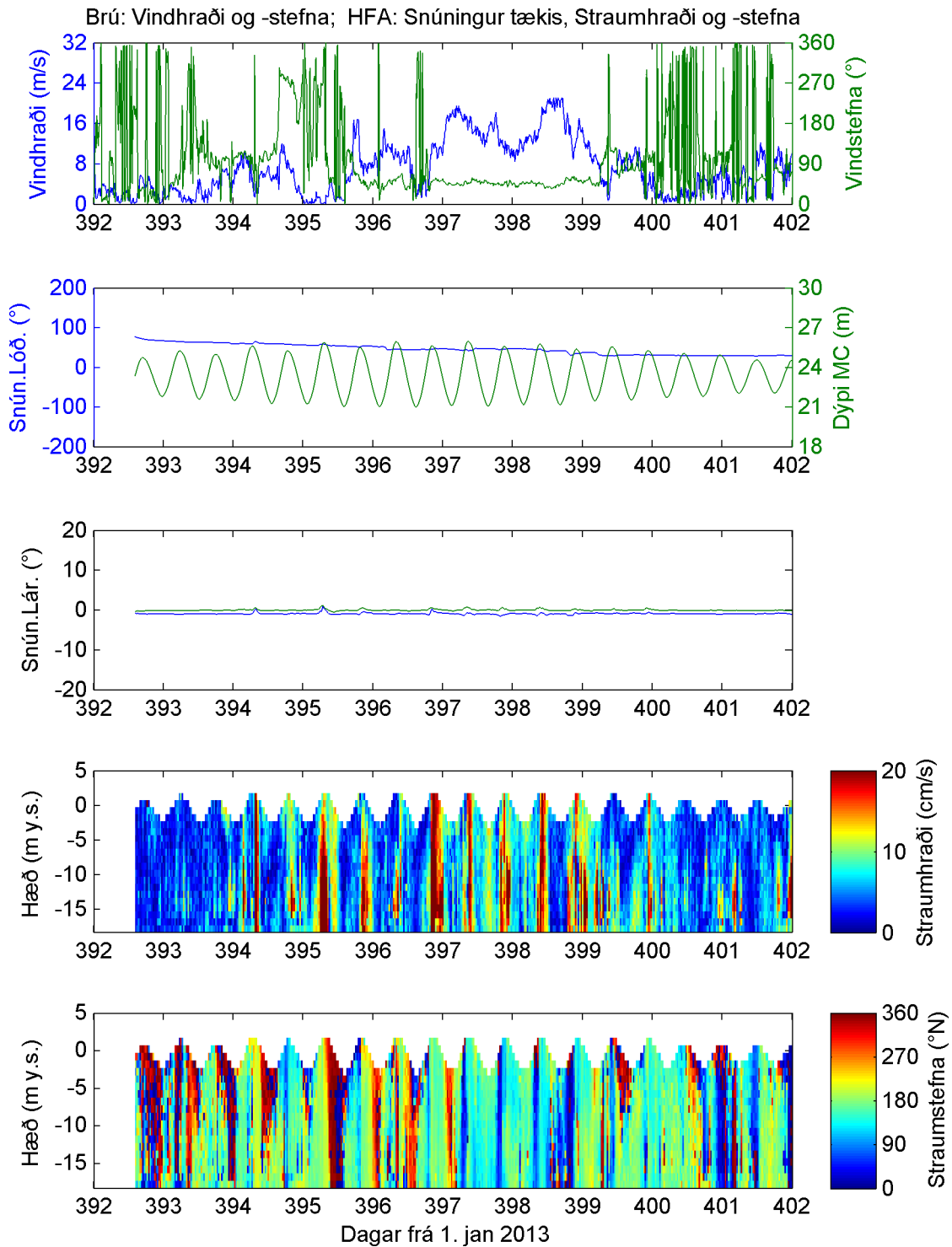
Mynd A. 41. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumshá HSV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-11-16 til 2013-11-26.



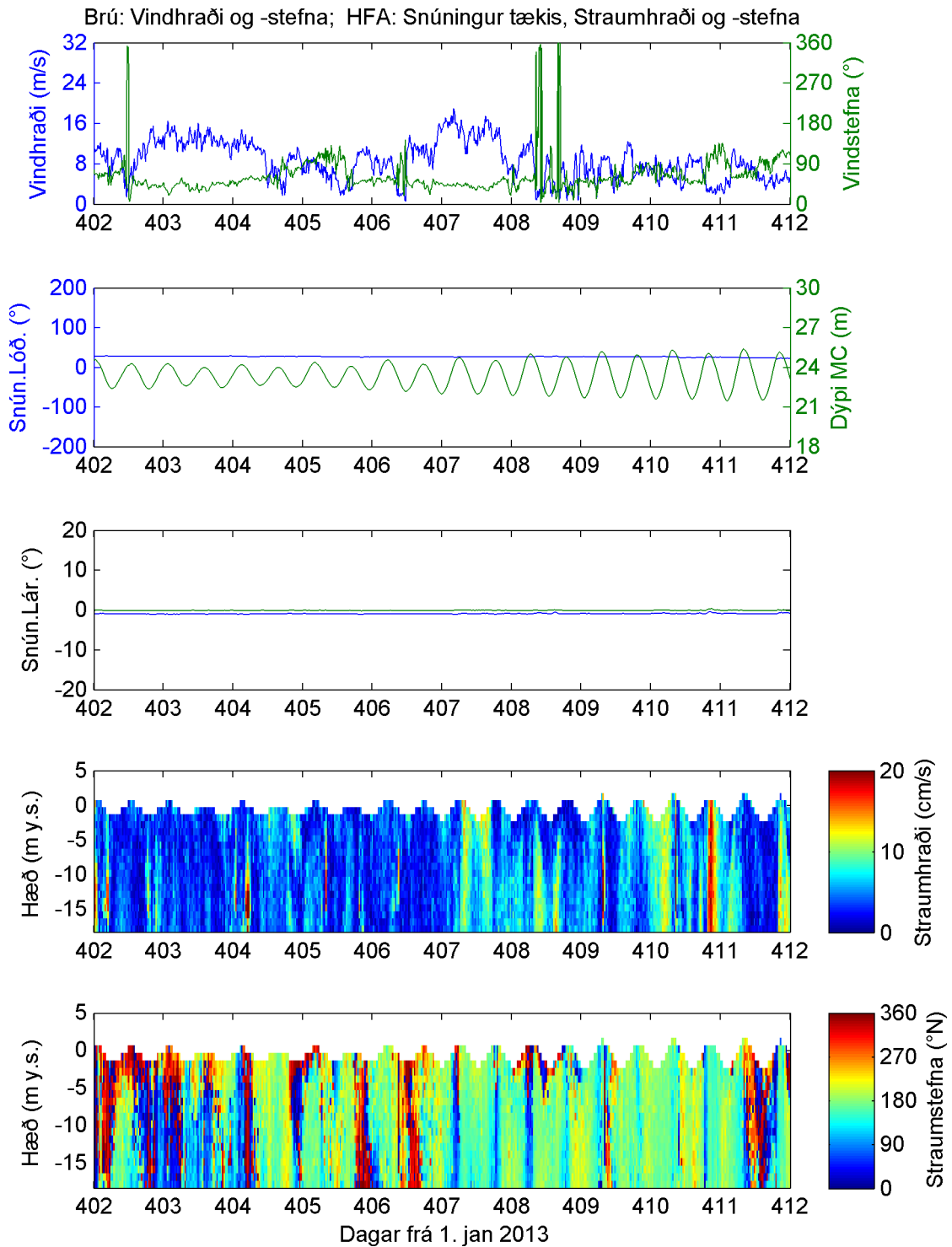
Mynd A. 42. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumshá HSV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2013-11-26 til 2013-12-06.



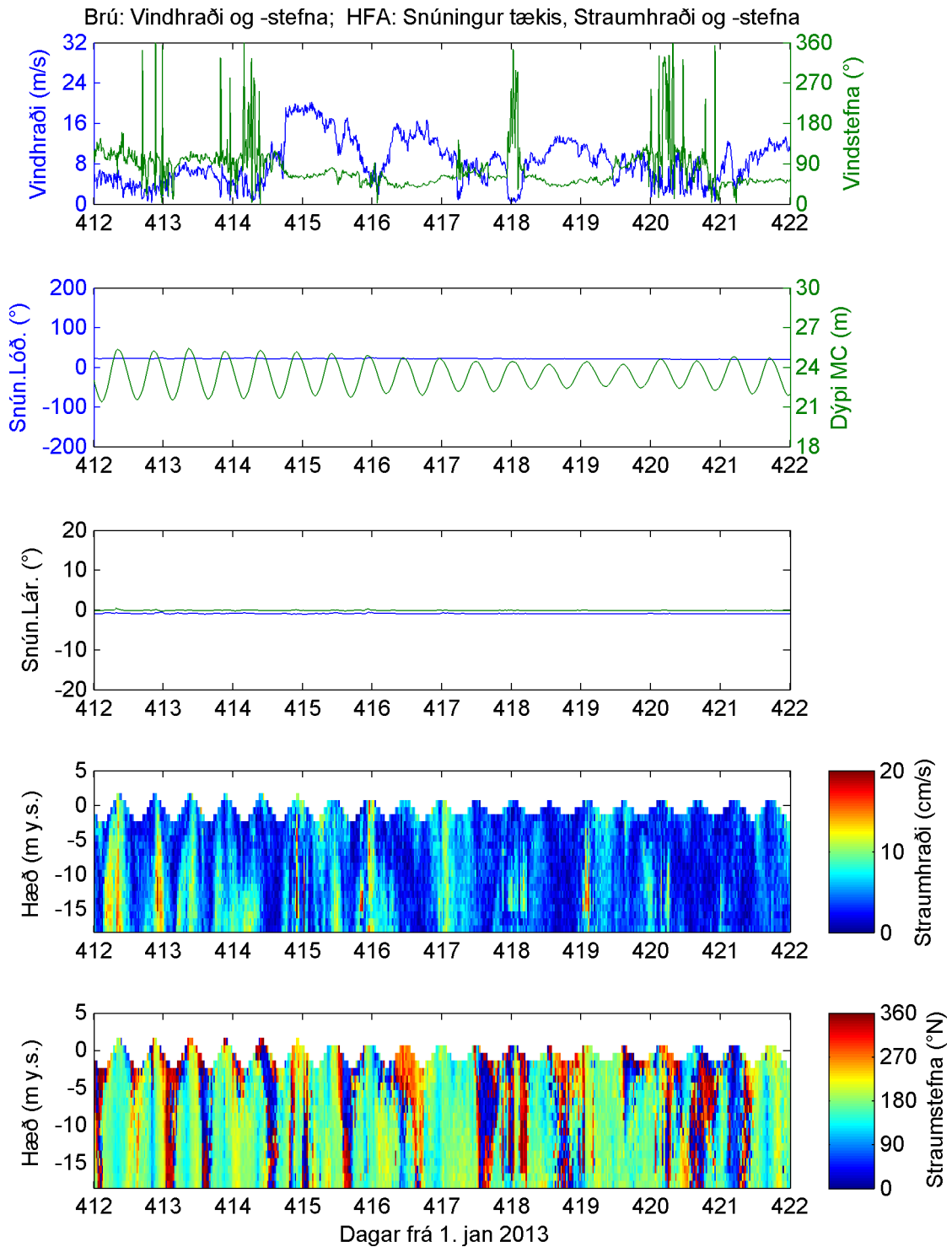
Mynd A. 43. Dýpi MicroCAT mælis á lögn HFA út frá mældum þrýstingi, hita og seltu (efra graf) fært yfir í hæð yfir meðalsjó (neðra graf). 2014-01-26 til 2013-04-26.



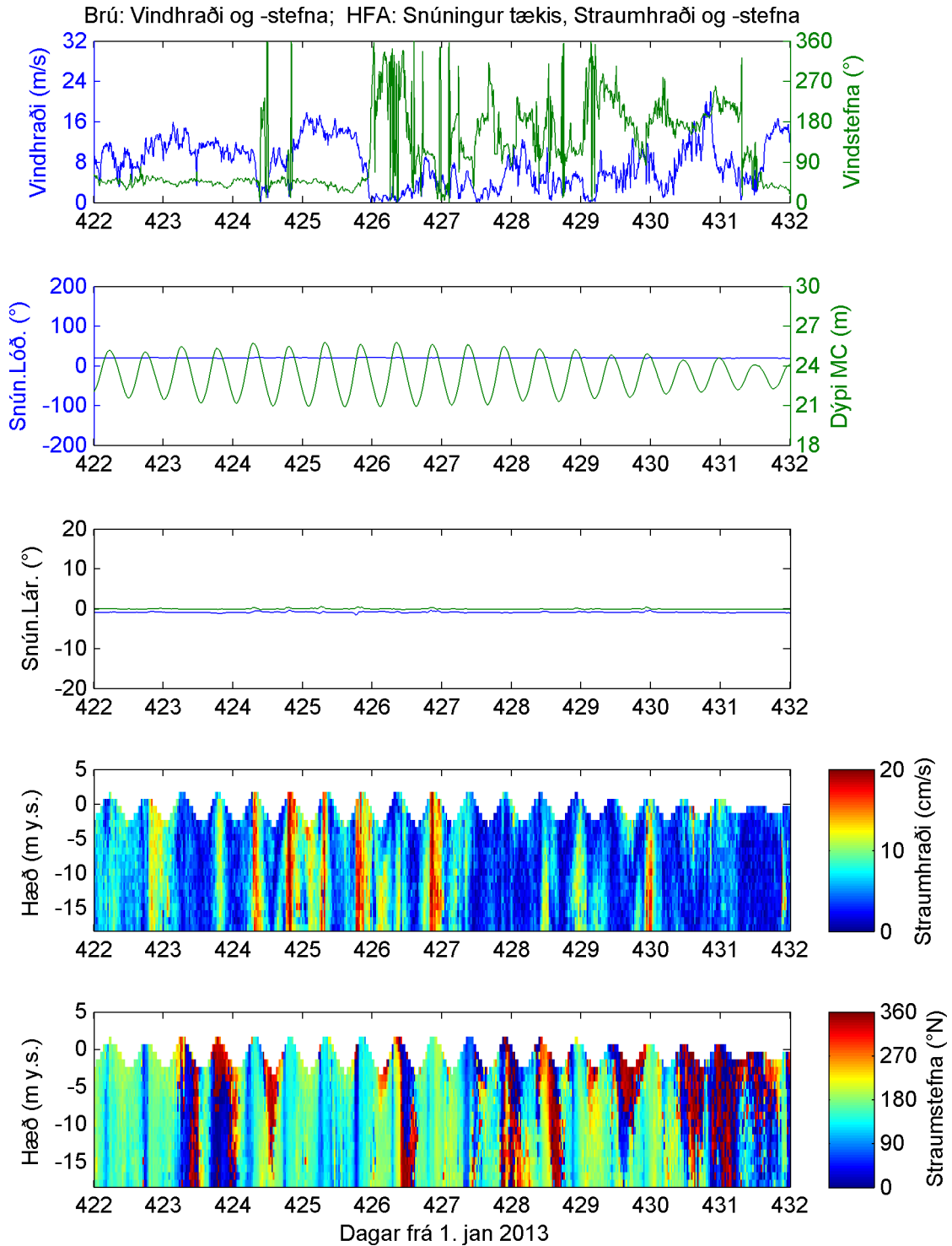
Mynd A. 44. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HFA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-01-28 til 2014-02-07.



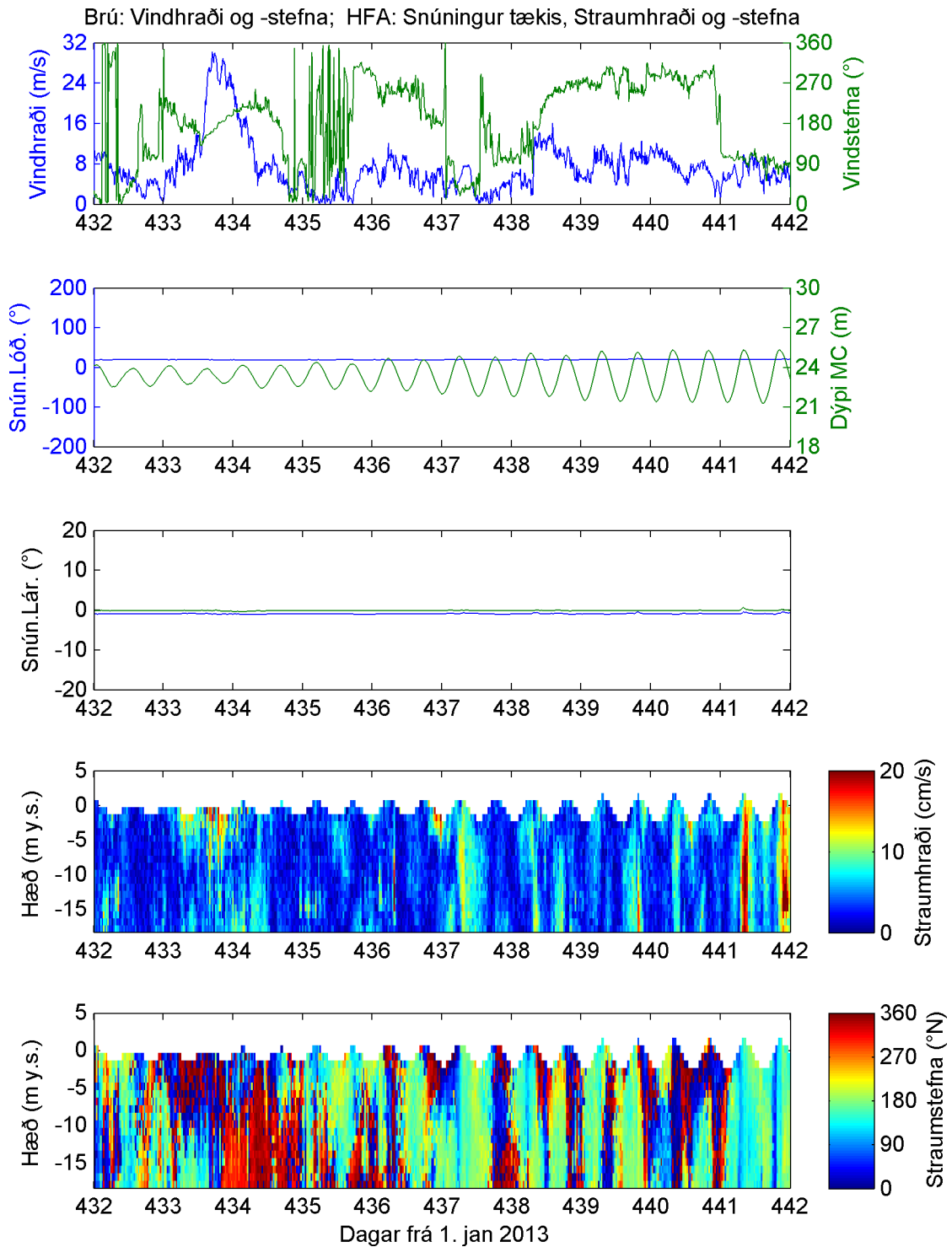
Mynd A. 45. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HFA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-02-07 til 2014-02-17.



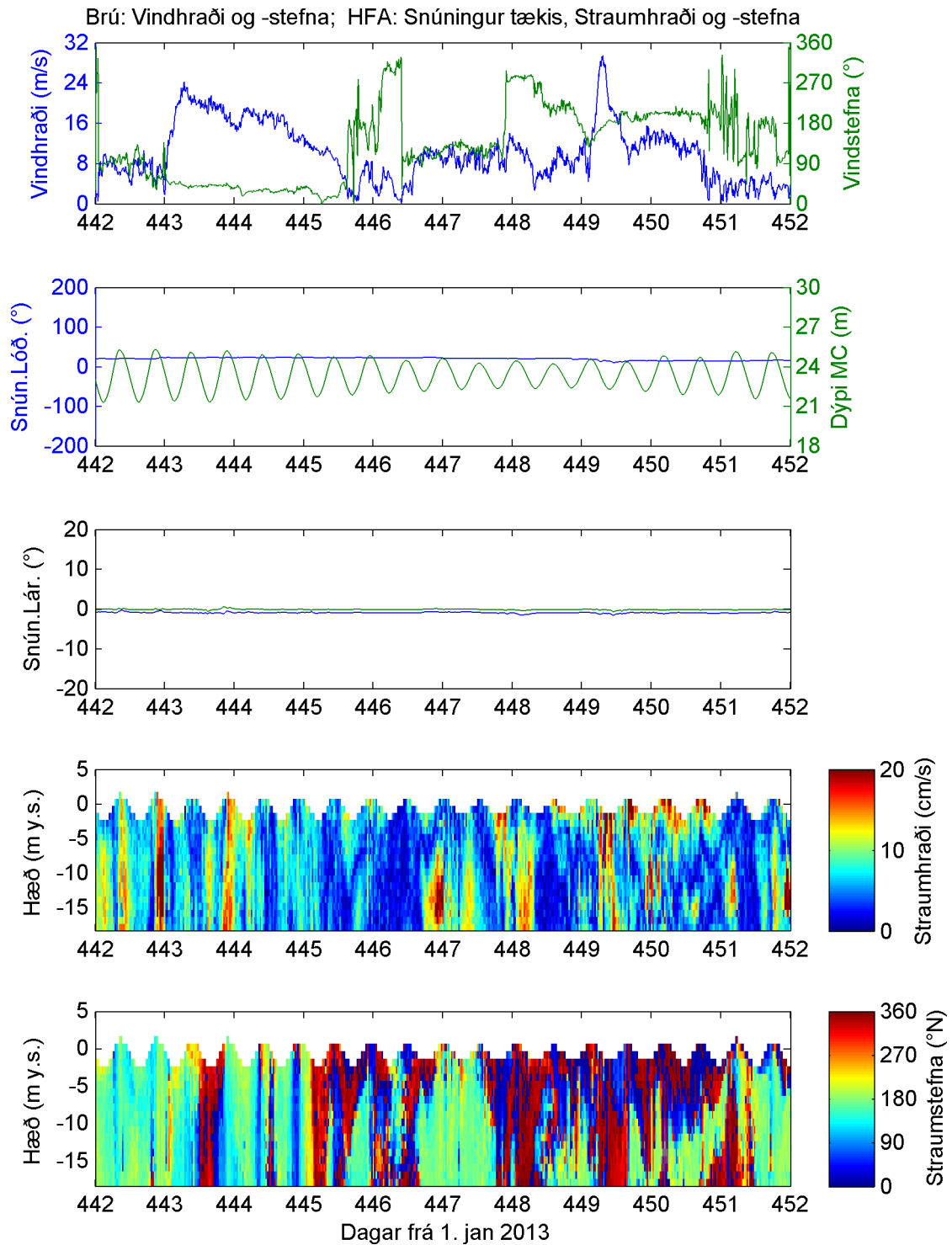
Mynd A. 46. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HFA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-02-17 til 2014-02-27.



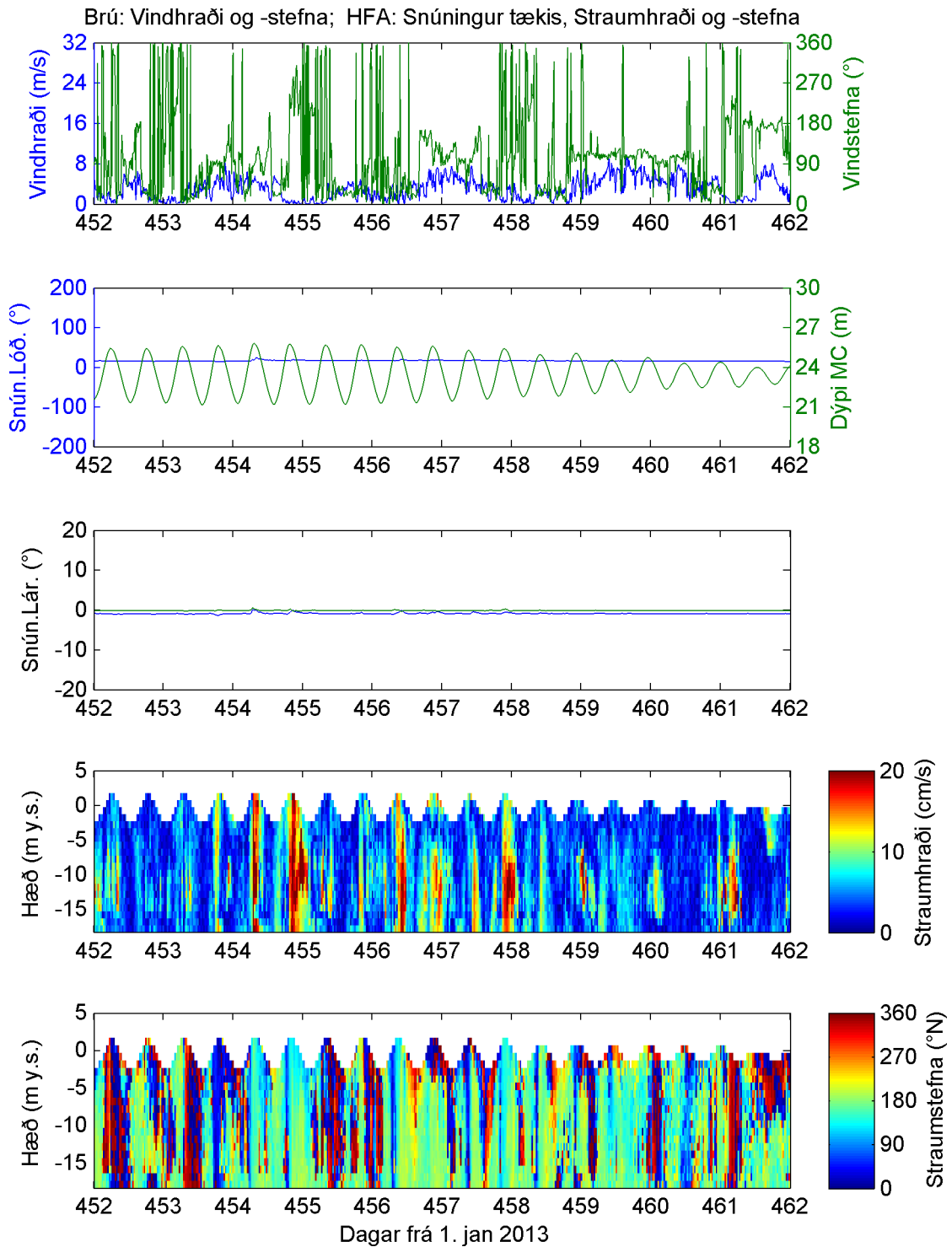
Mynd A. 47. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumshjá HFA: snúningur tækis og dýpi tilsvareandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-02-27 til 2014-03-09.



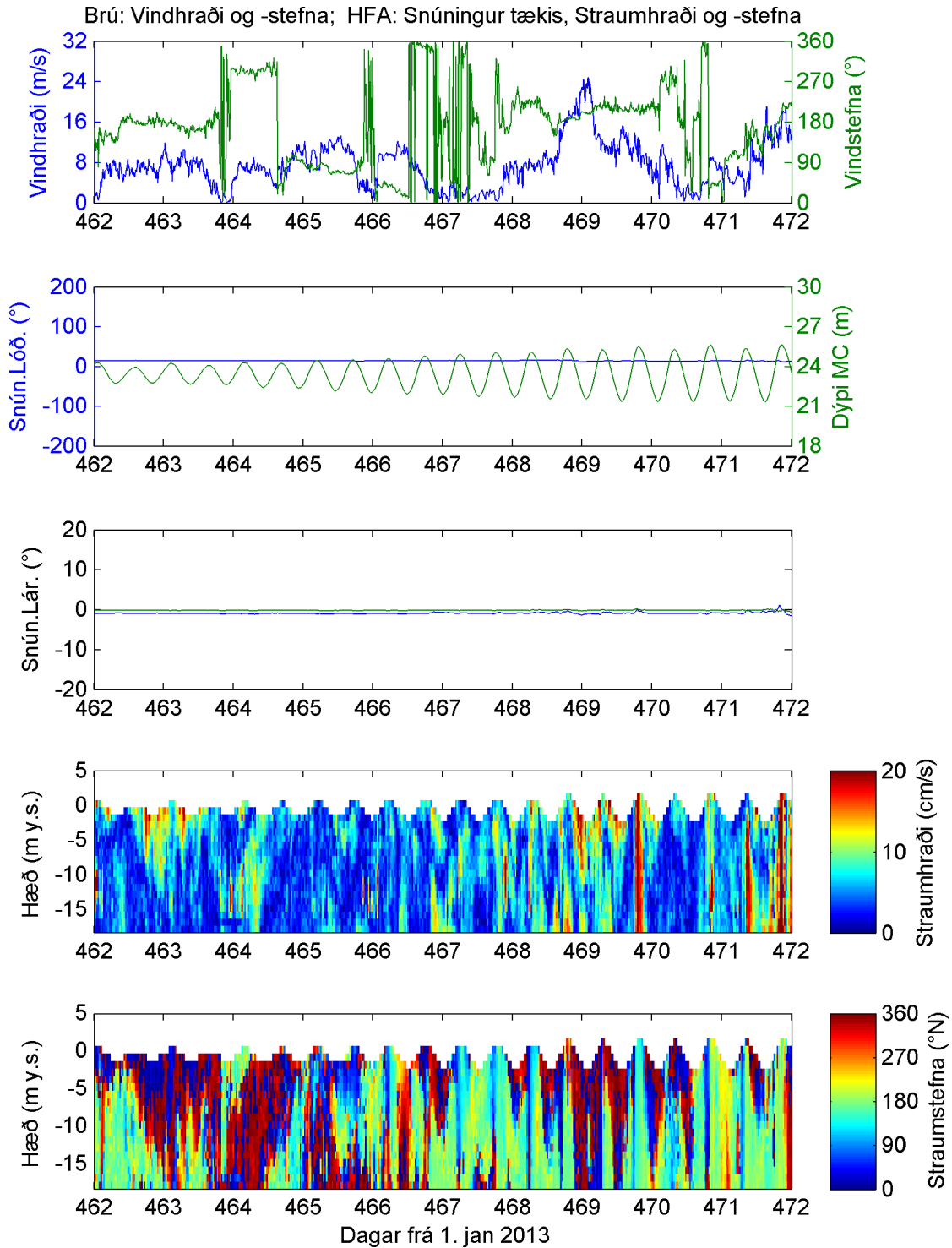
Mynd A. 48. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HFA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-03-09 til 2014-03-19.



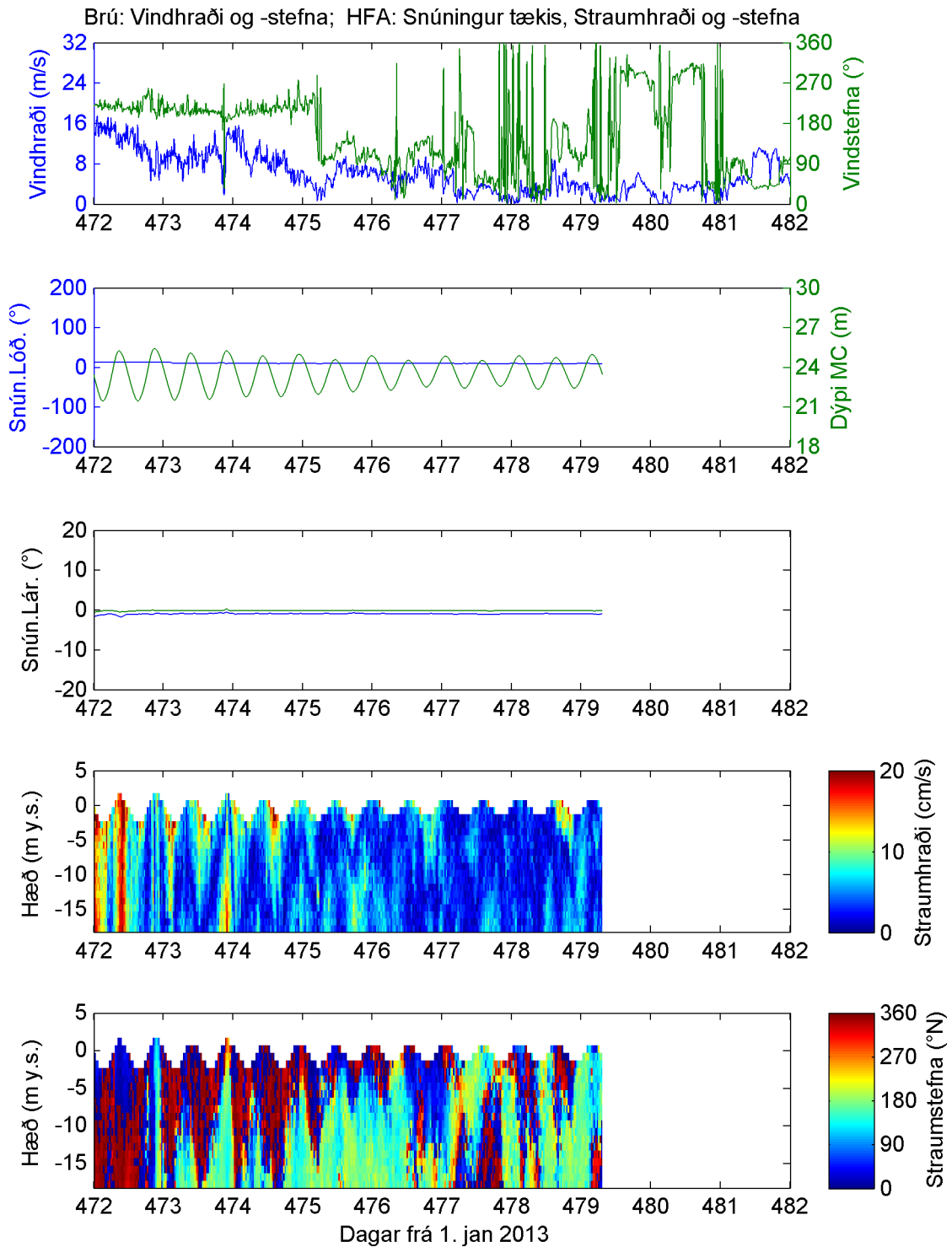
Mynd A. 49. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HFA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-03-19 til 2014-03-29.



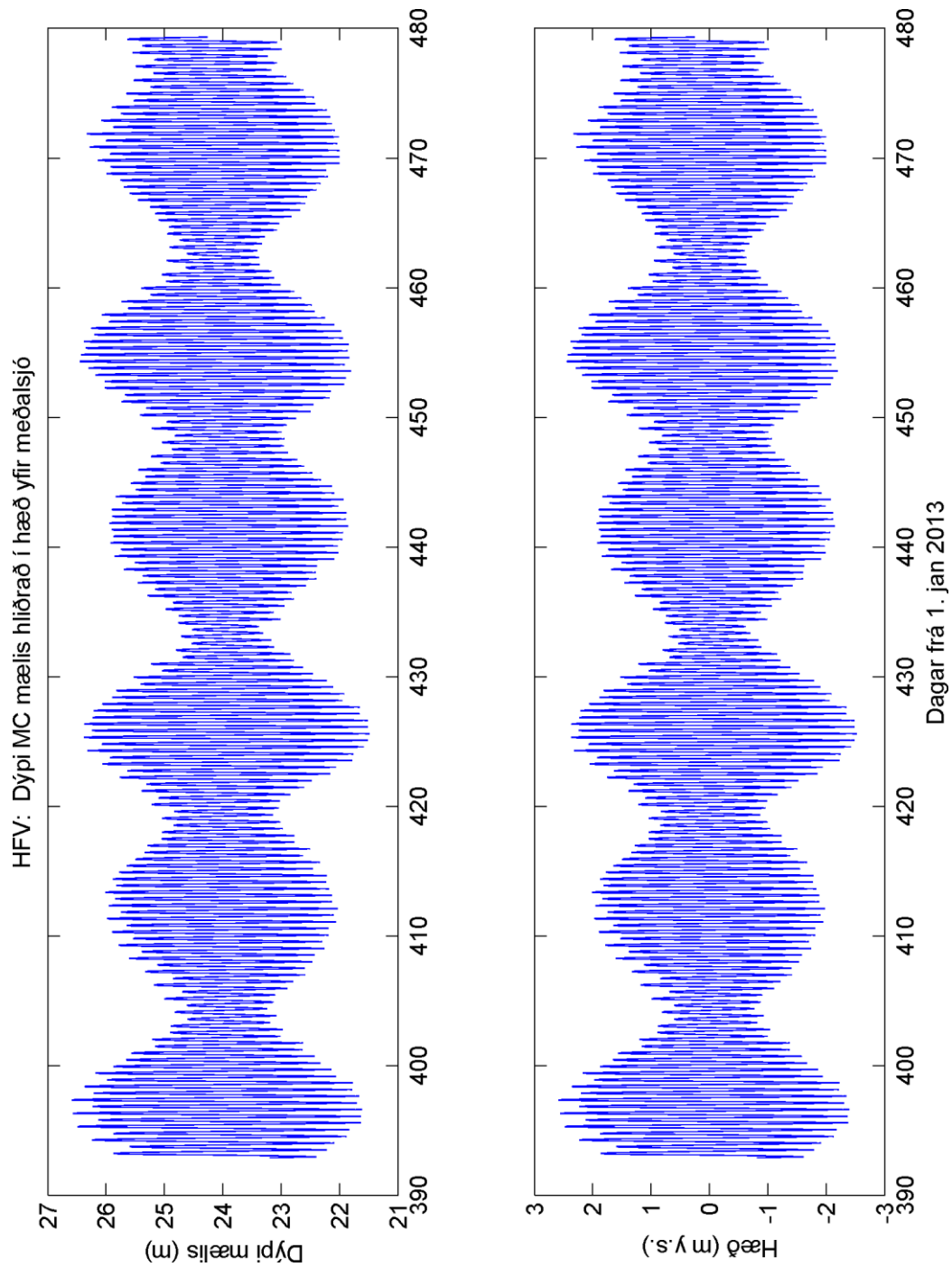
Mynd A. 50. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HFA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-03-29 til 2014-04-08.



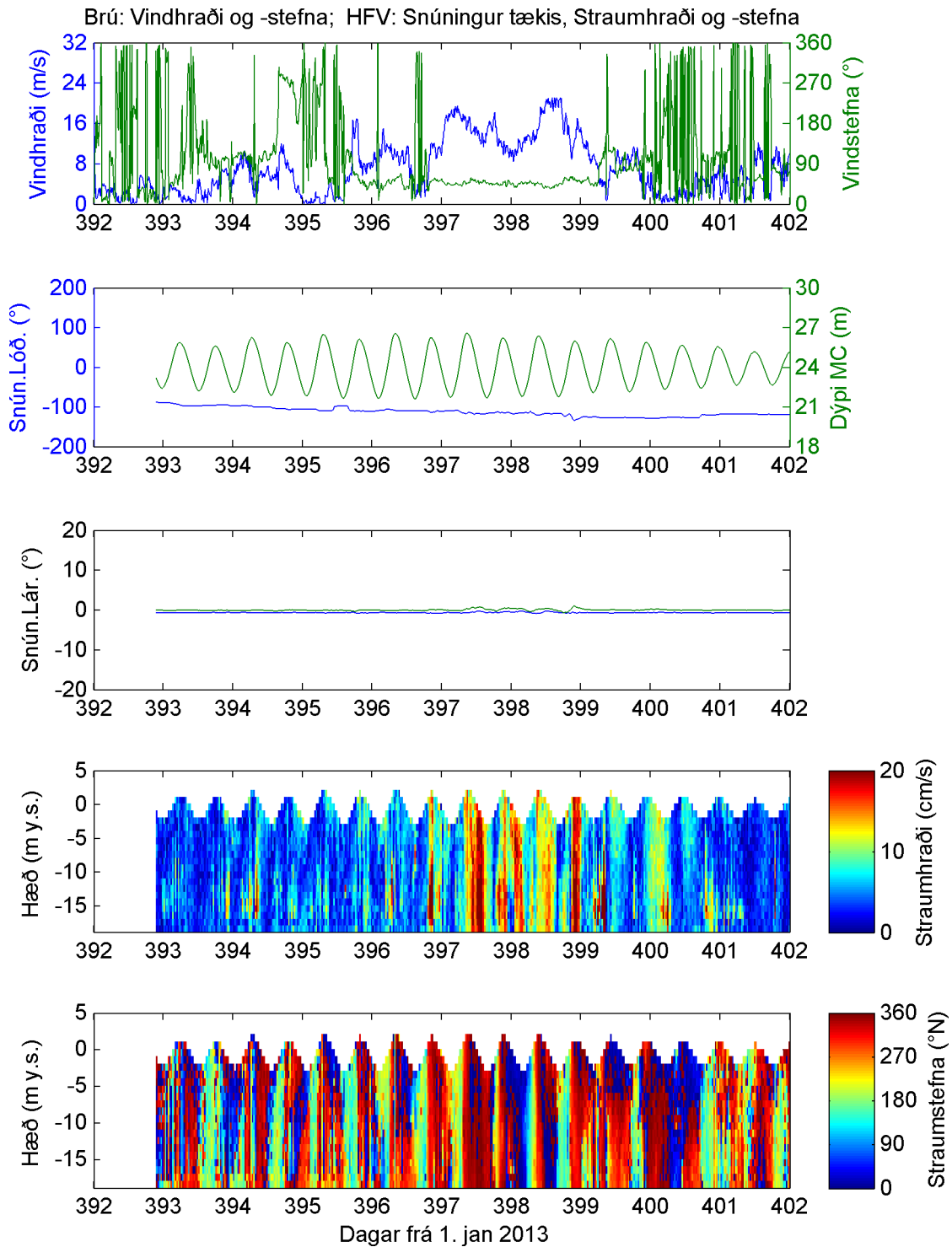
Mynd A. 51. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HFA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-04-08 til 2014-04-18.



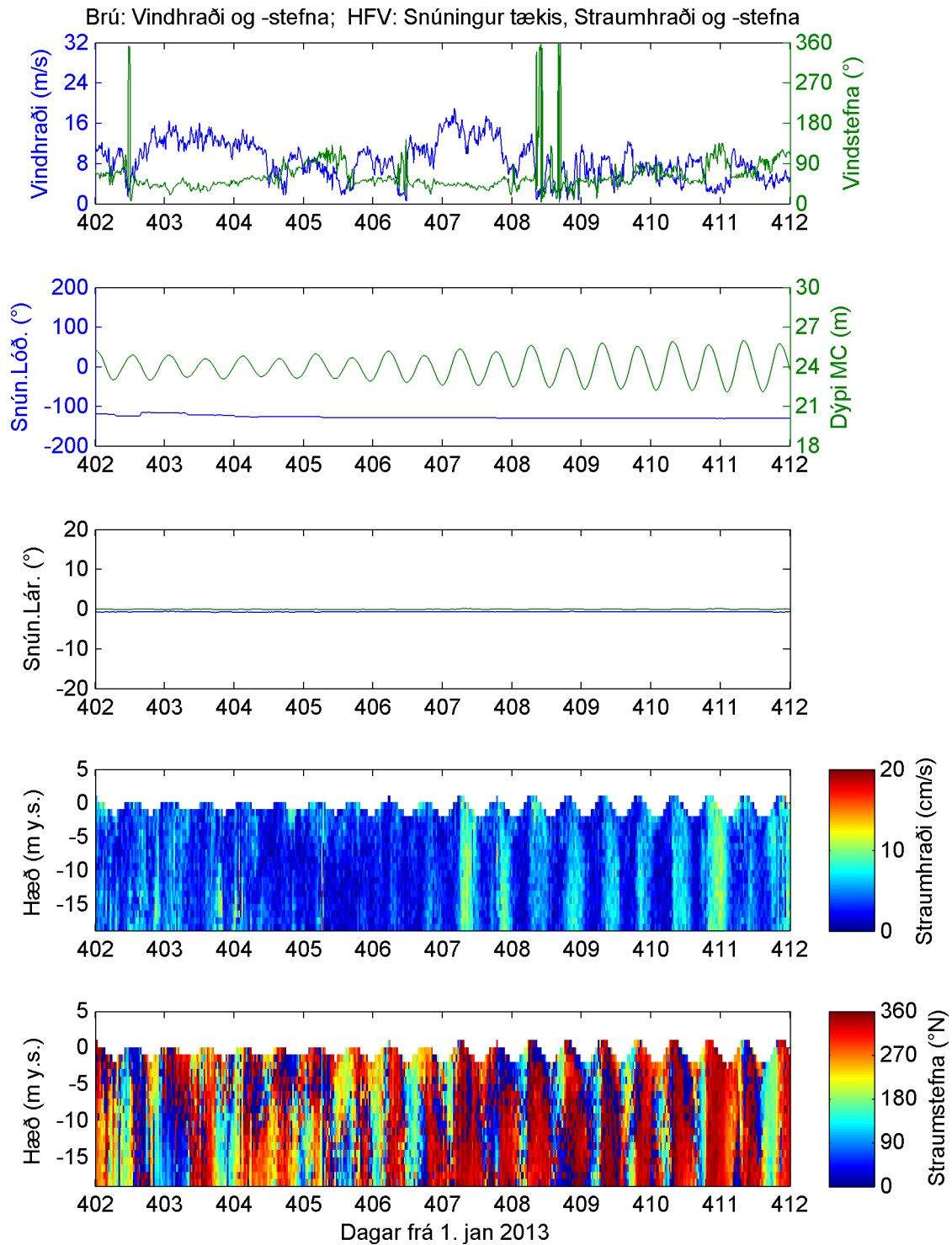
Mynd A. 52. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HFA: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-04-18 til 2014-04-28.



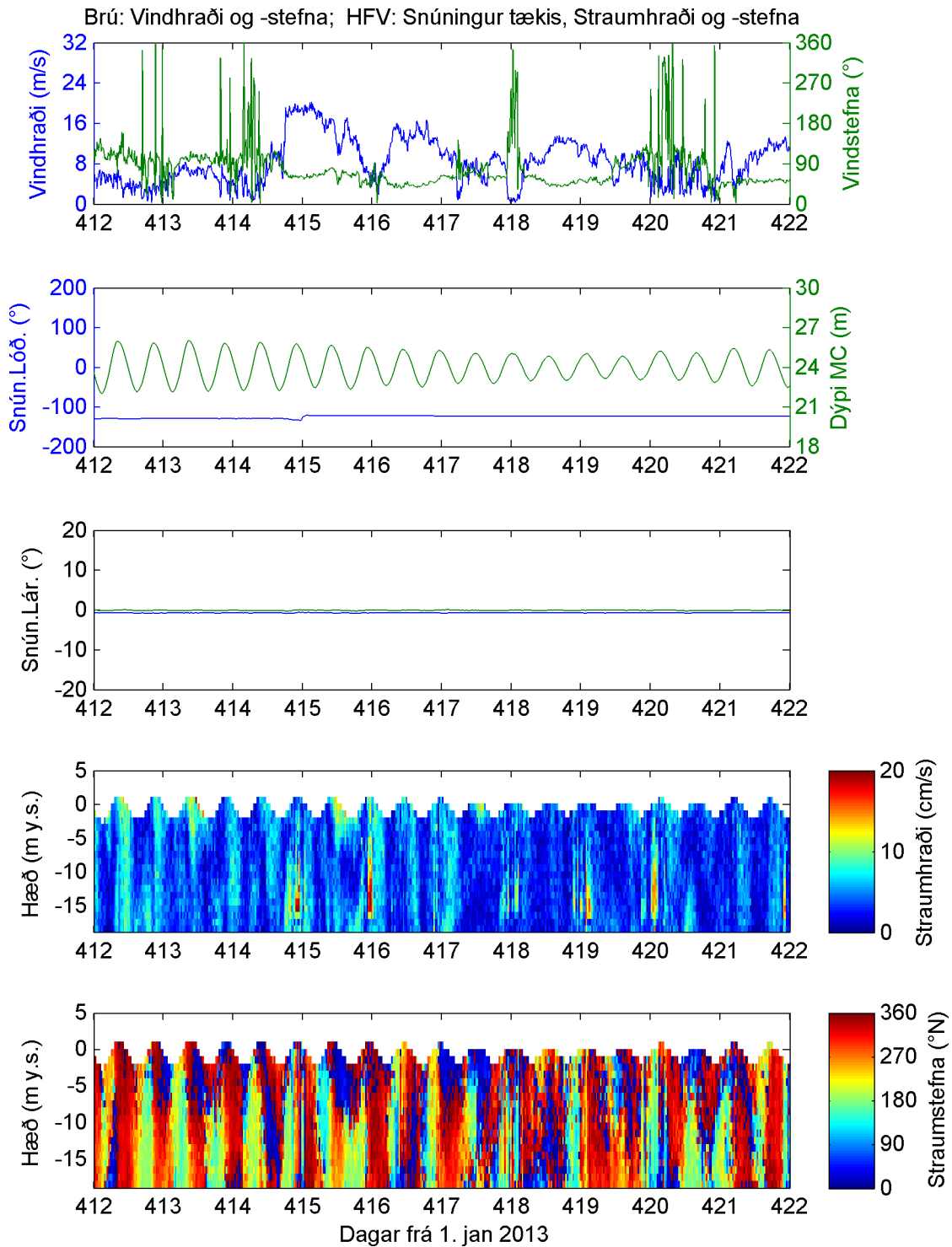
Mynd A. 53. Dýpi MicroCAT mælis á lögn HFV út frá mældum þrýstingi, hita og seltu (efra graf) fært yfir í hæð yfir meðalsjó (neðra graf). 2014-01-26 til 2013-04-26.



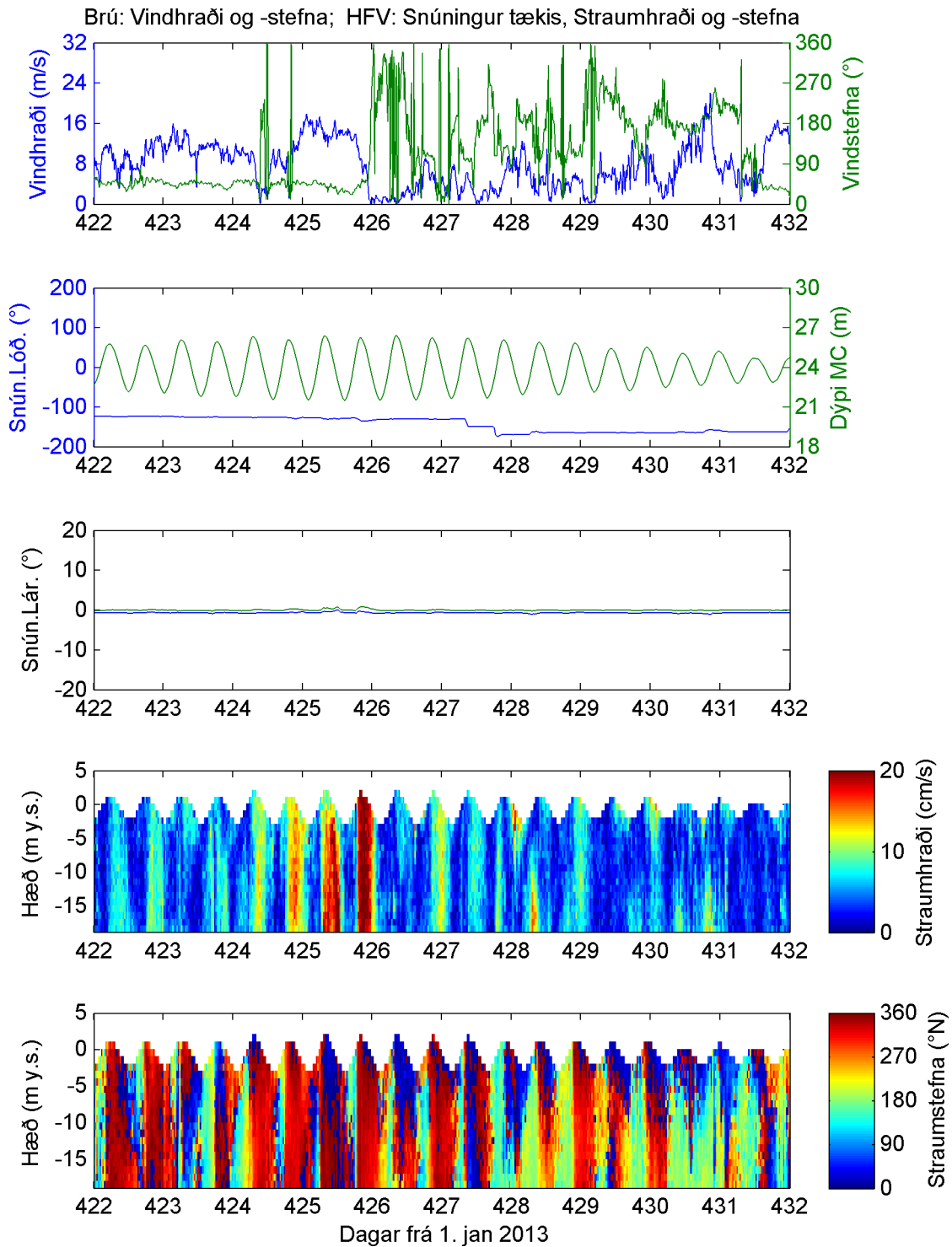
Mynd A. 54. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HFV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-01-28 til 2014-02-07.



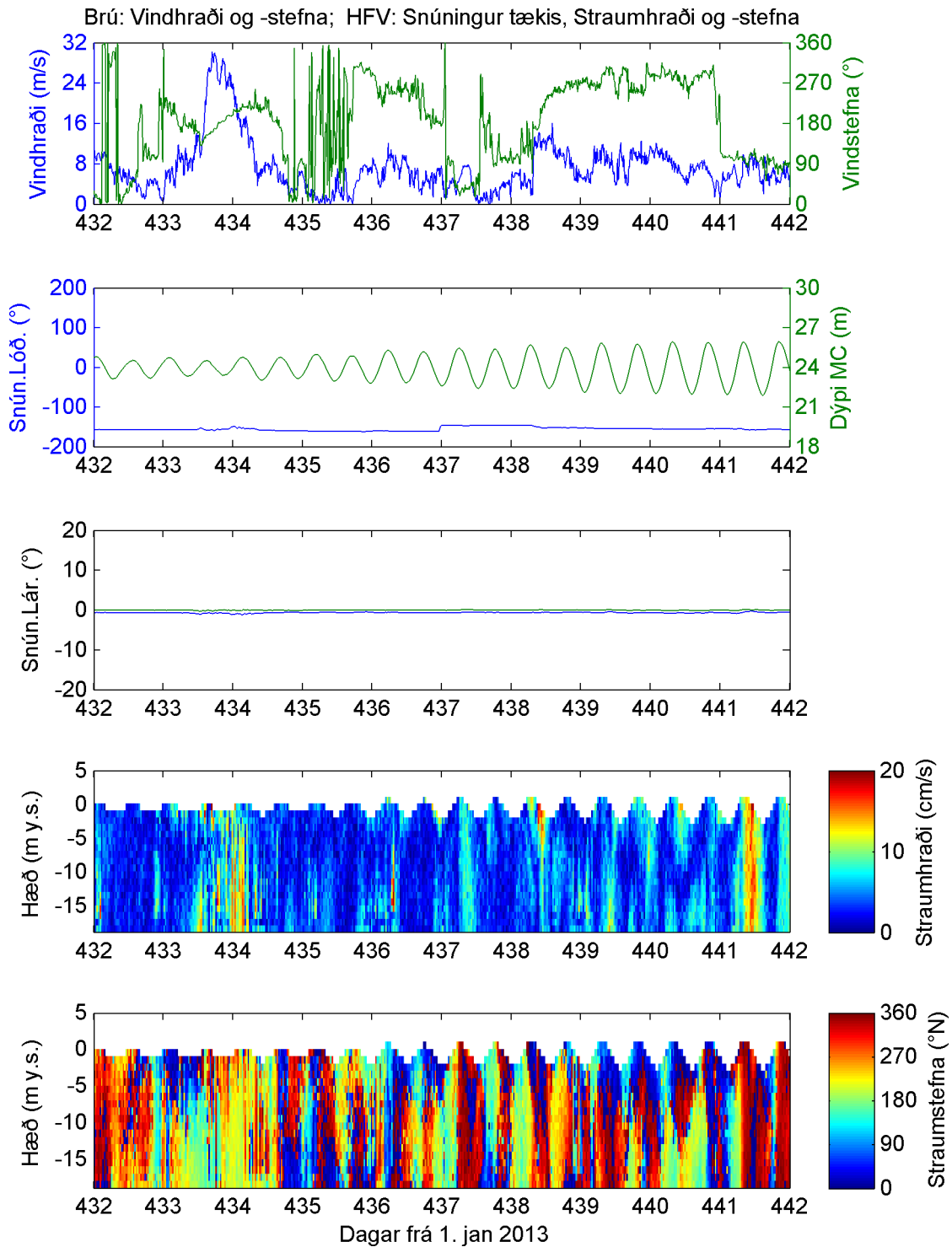
Mynd A. 55. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumsjá HFV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-02-07 til 2014-02-17.



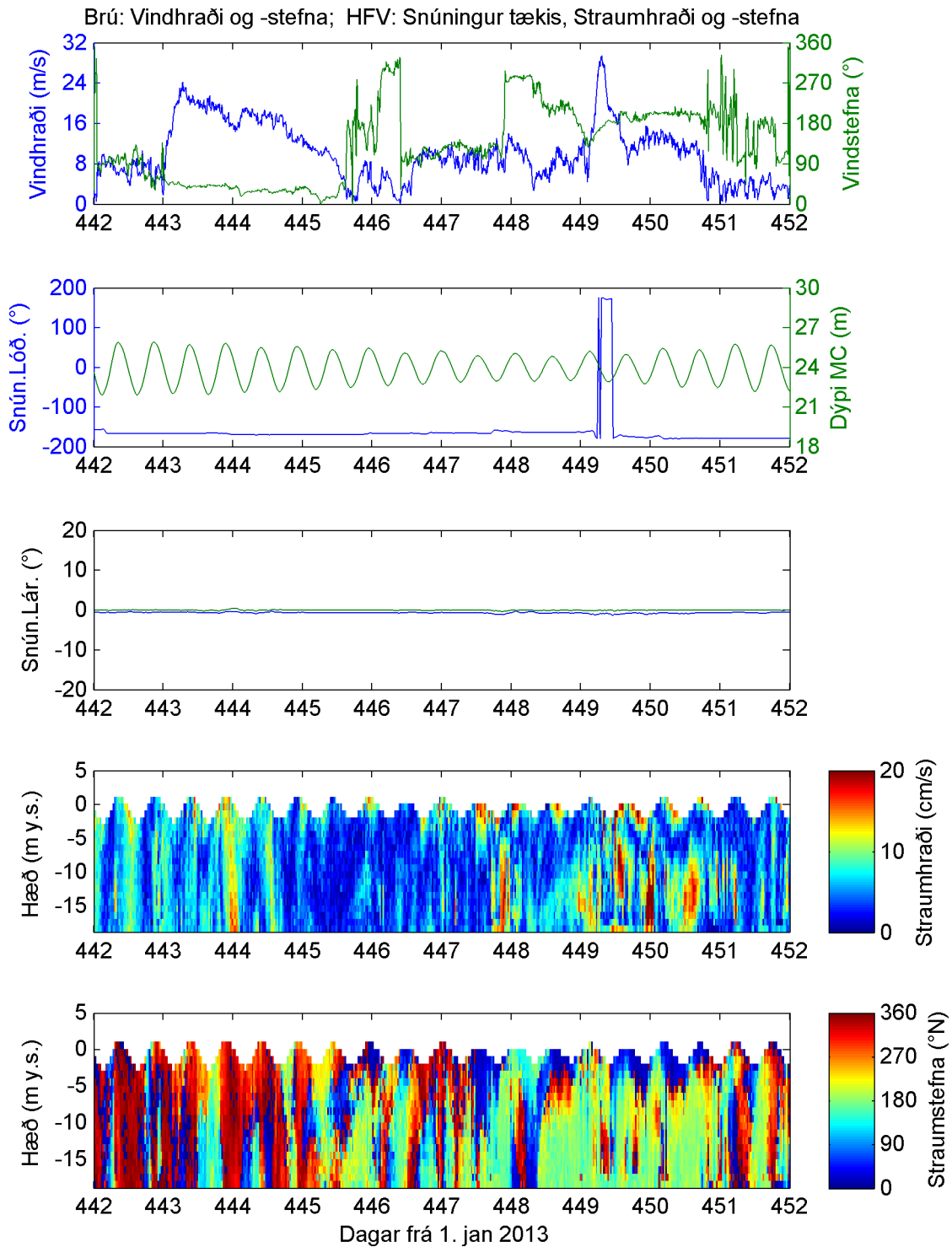
Mynd A. 56. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HFV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-02-17 til 2014-02-27.



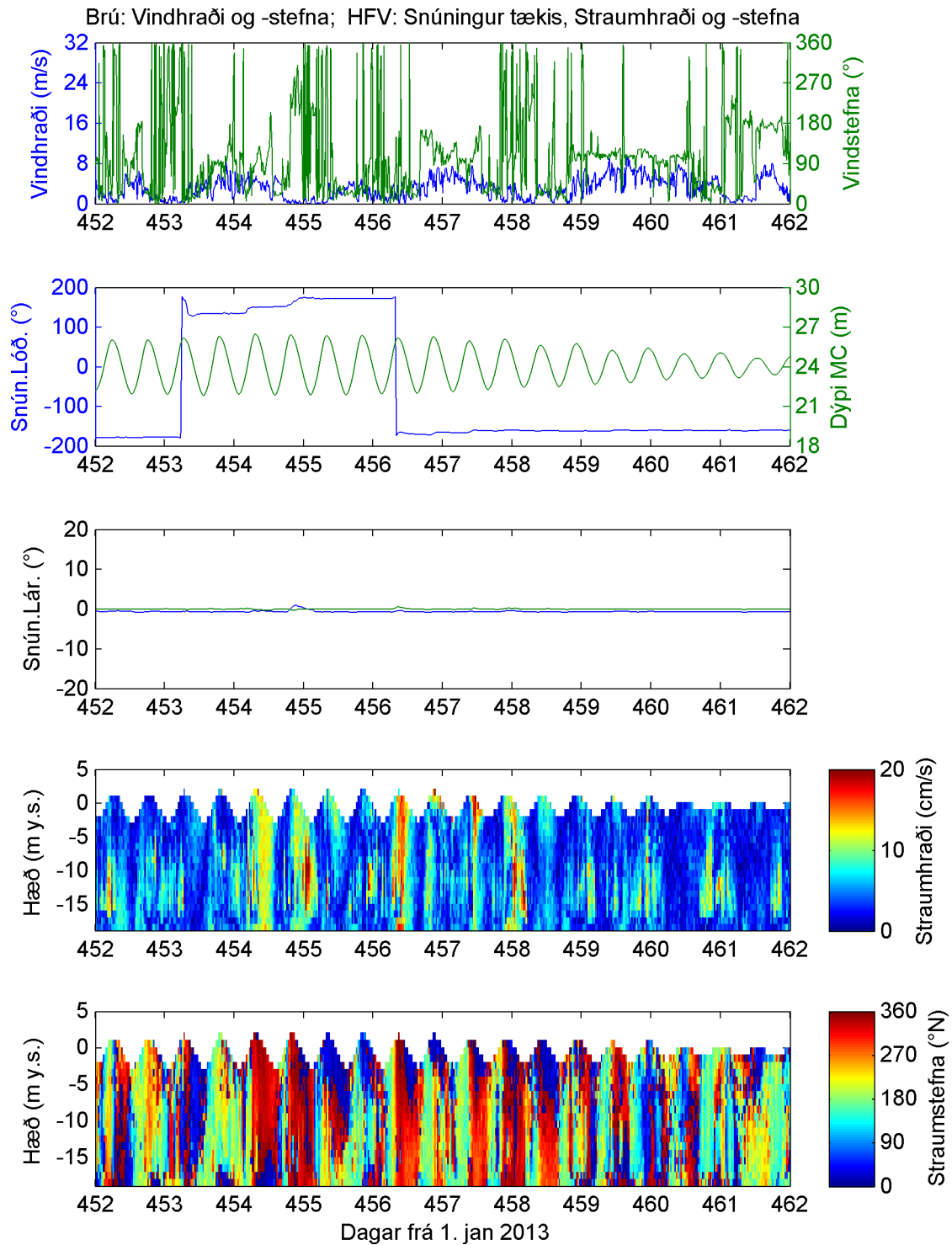
Mynd A. 57. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumslá HFV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-02-27 til 2014-03-09.



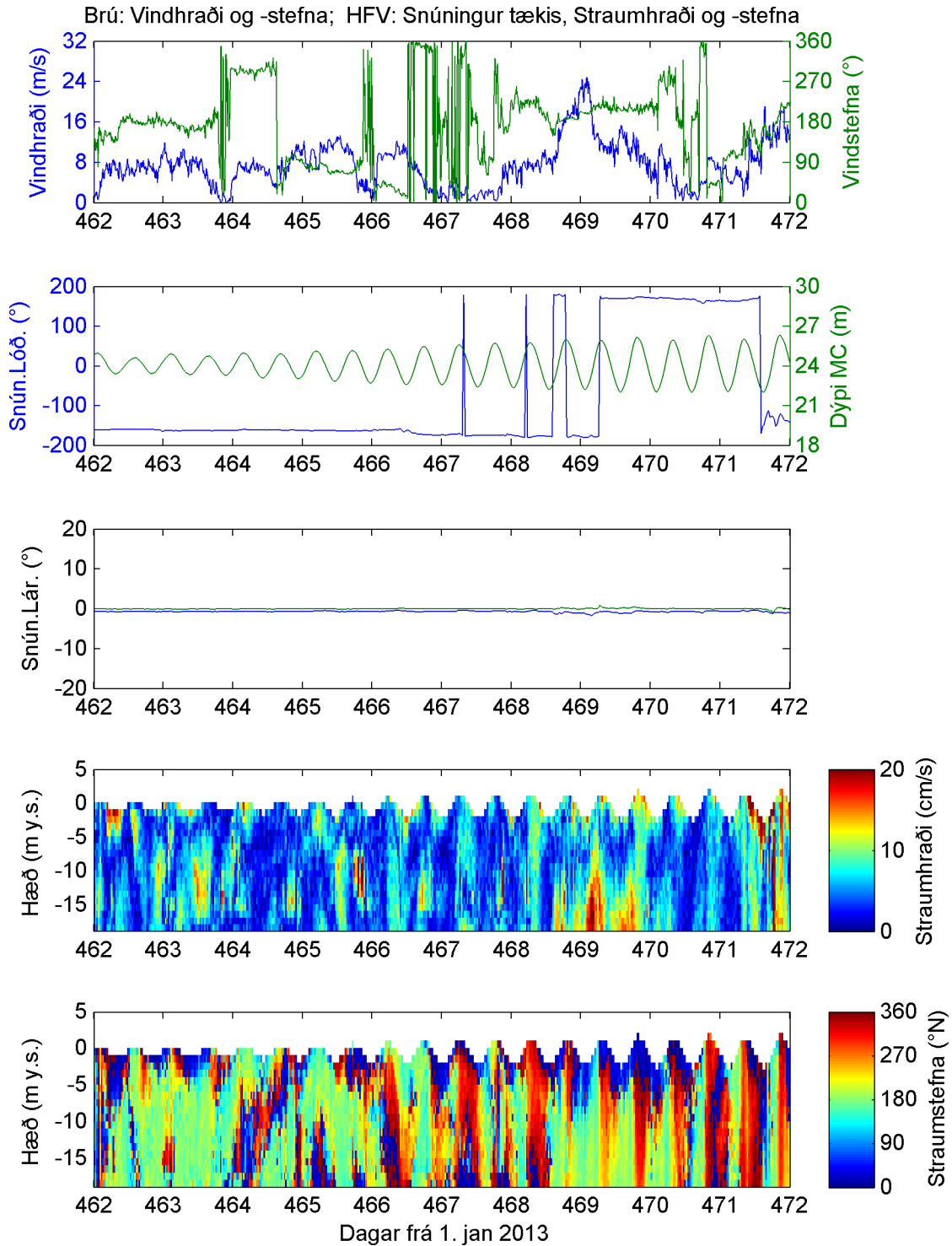
Mynd A. 58. Vindhraði og –stefna á Brú; Straumslá HFV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og –stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-03-09 til 2014-03-19.



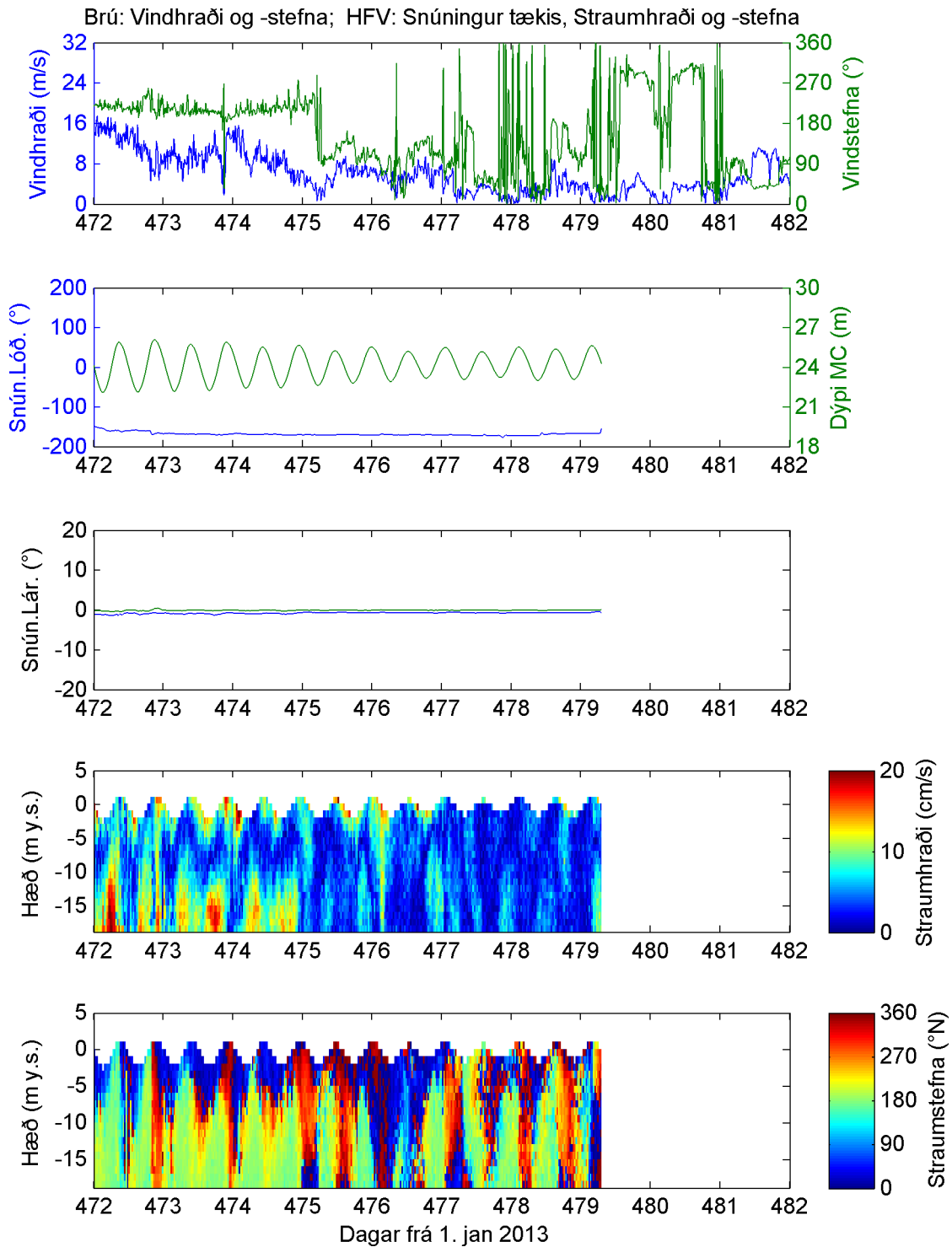
Mynd A. 59. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumslá HFV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-03-19 til 2014-03-29.



Mynd A. 60. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumsjá HFV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-03-29 til 2014-04-08.

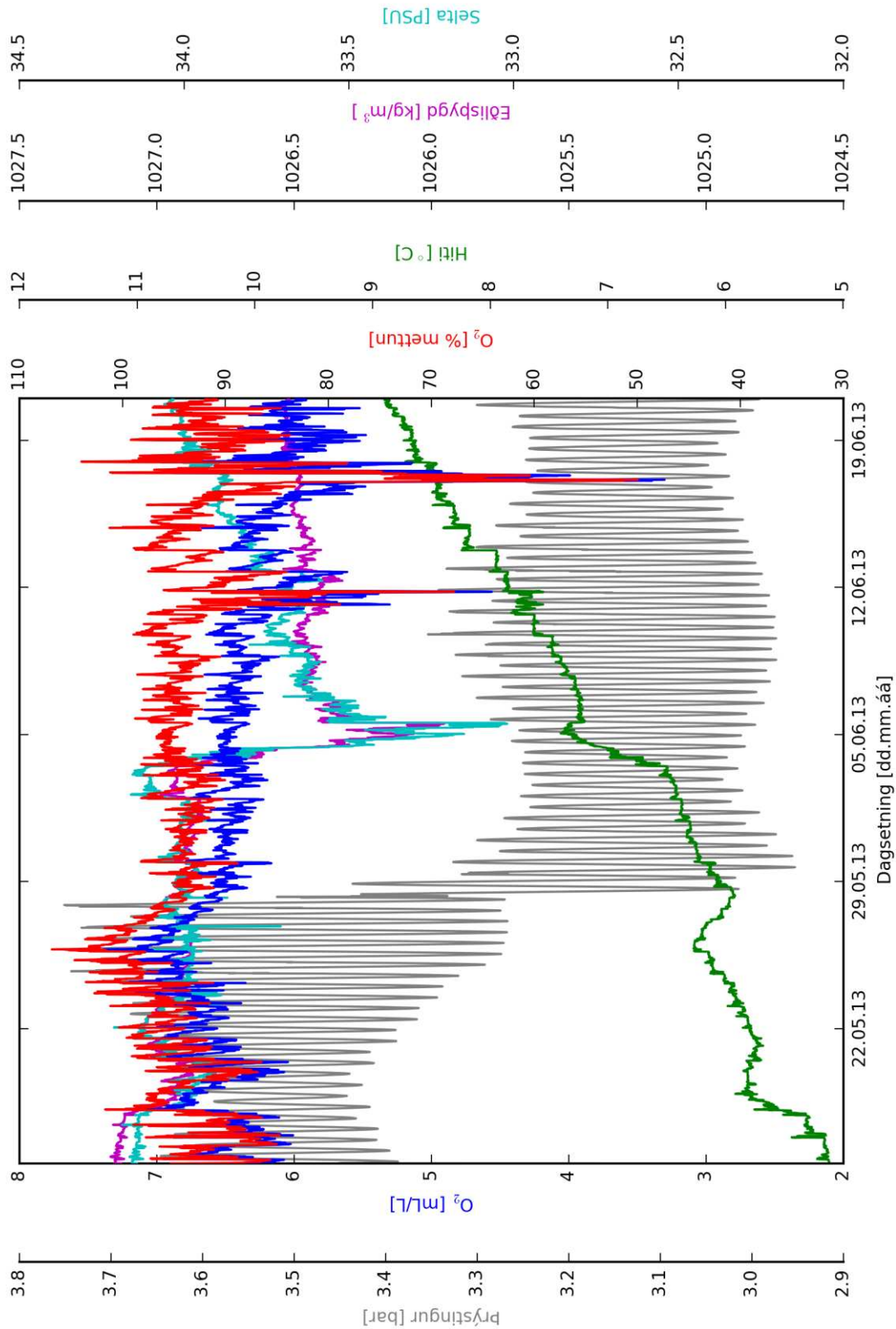


Mynd A. 61. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumslá HFV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-04-08 til 2014-04-18.

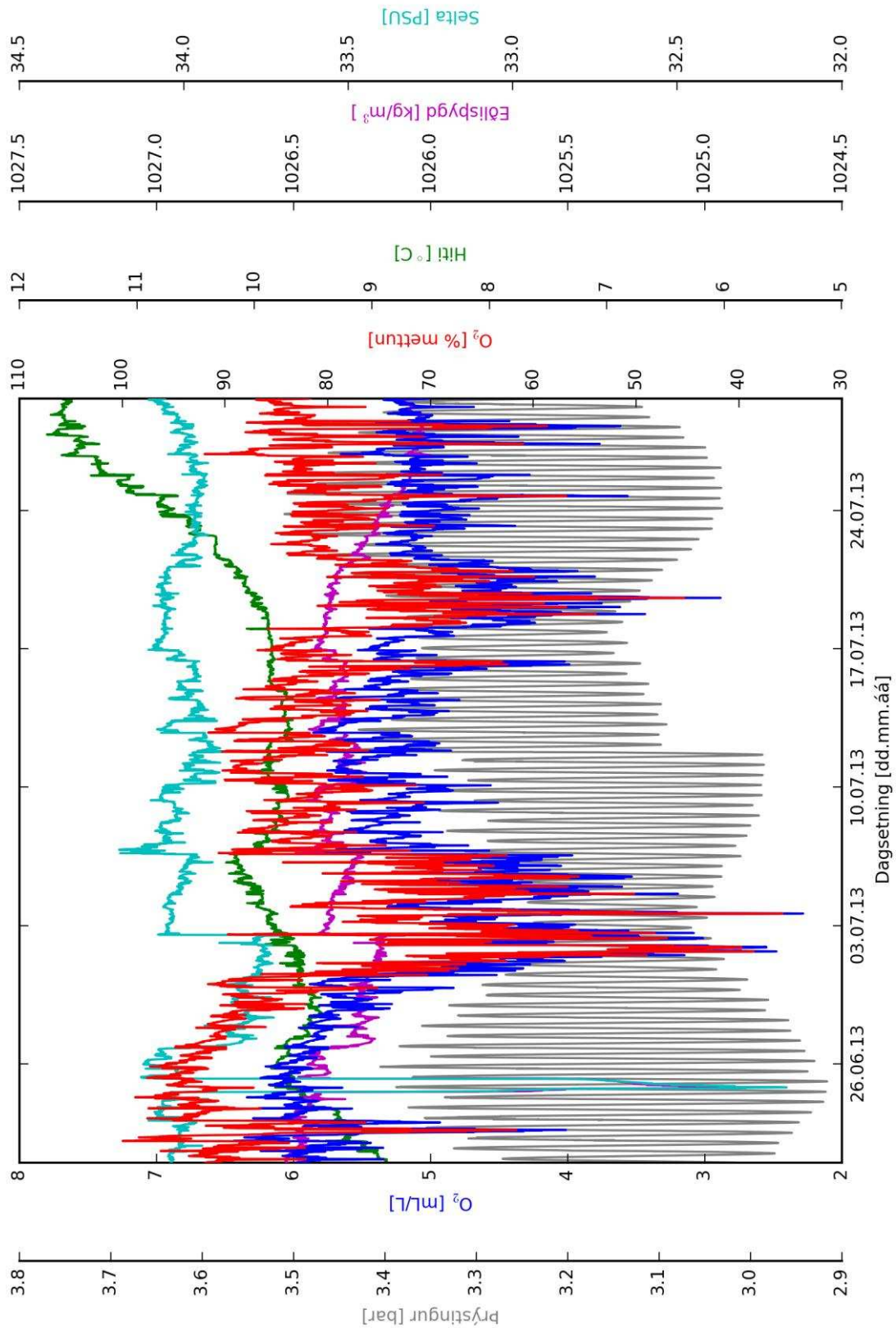


Mynd A. 62. Vindhraði og -stefna á Brú; Straumshjá HFV: snúningur tækis og dýpi tilsvandi MC, mældur straumhraði og -stefna m.v. hæð yfir meðalsjó. 2014-04-18 til 2014-04-28.

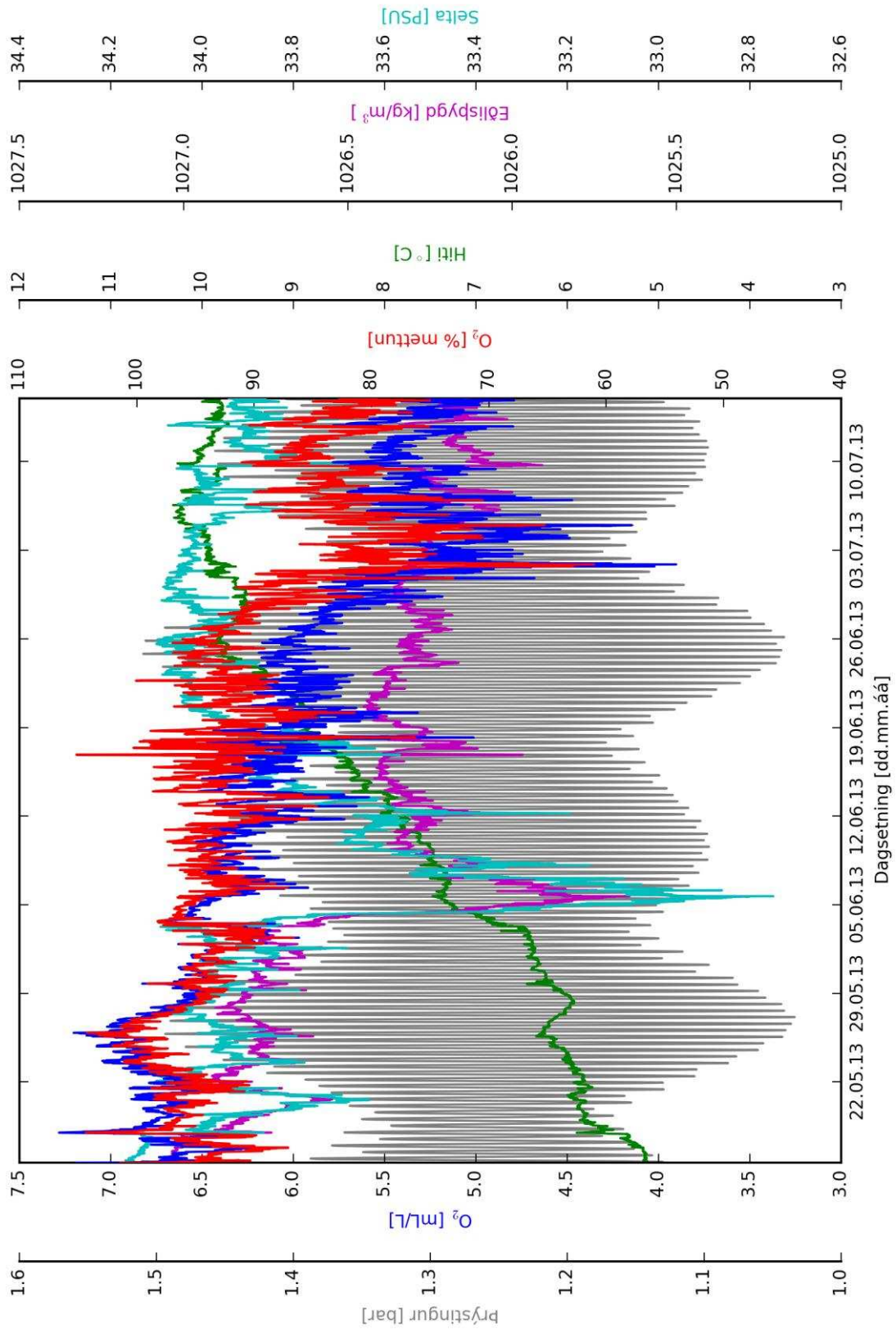
B. Vatnsgæðamælingar



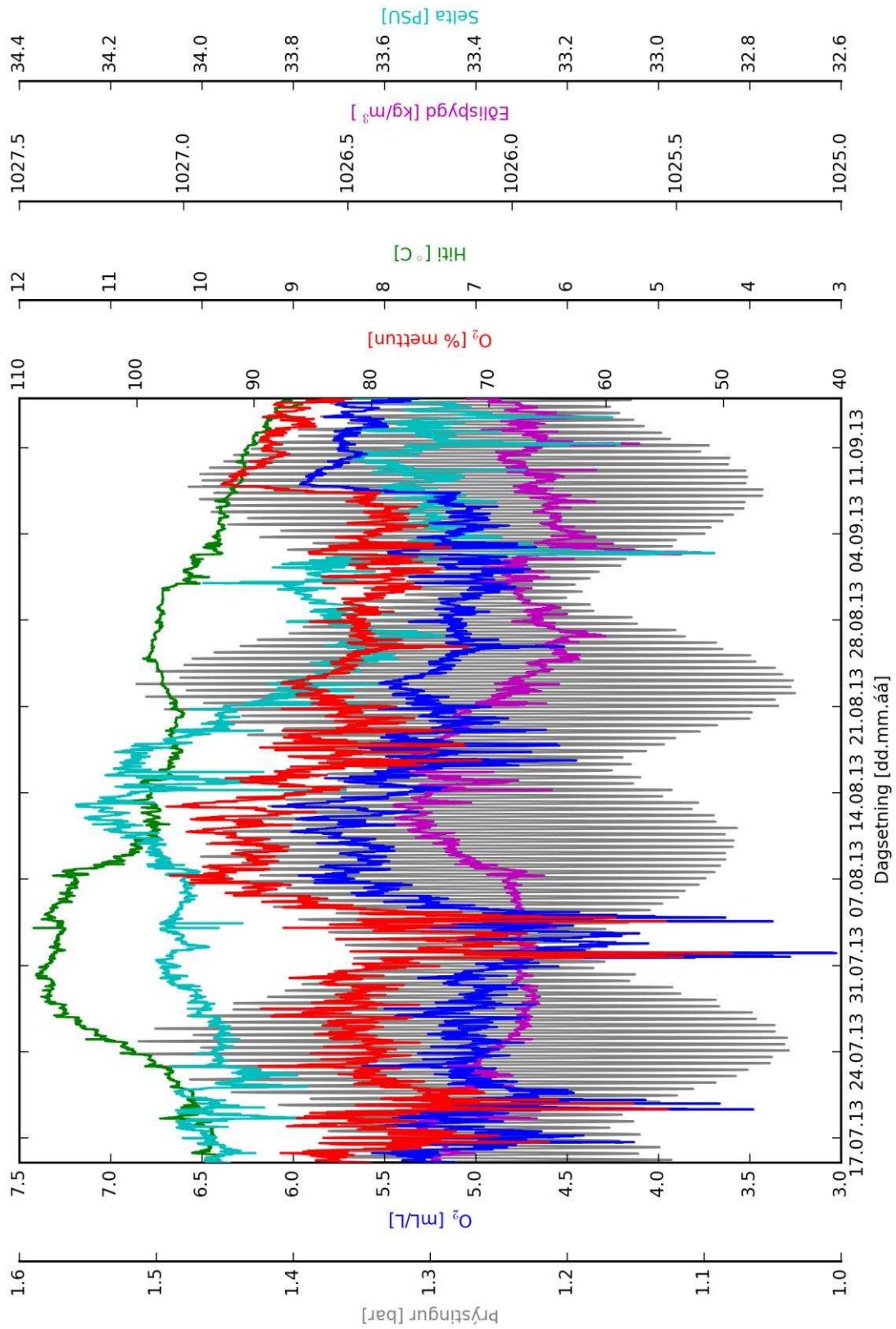
Mynd B. 1. Mælingar frá MicroCAT mæli við HFS.



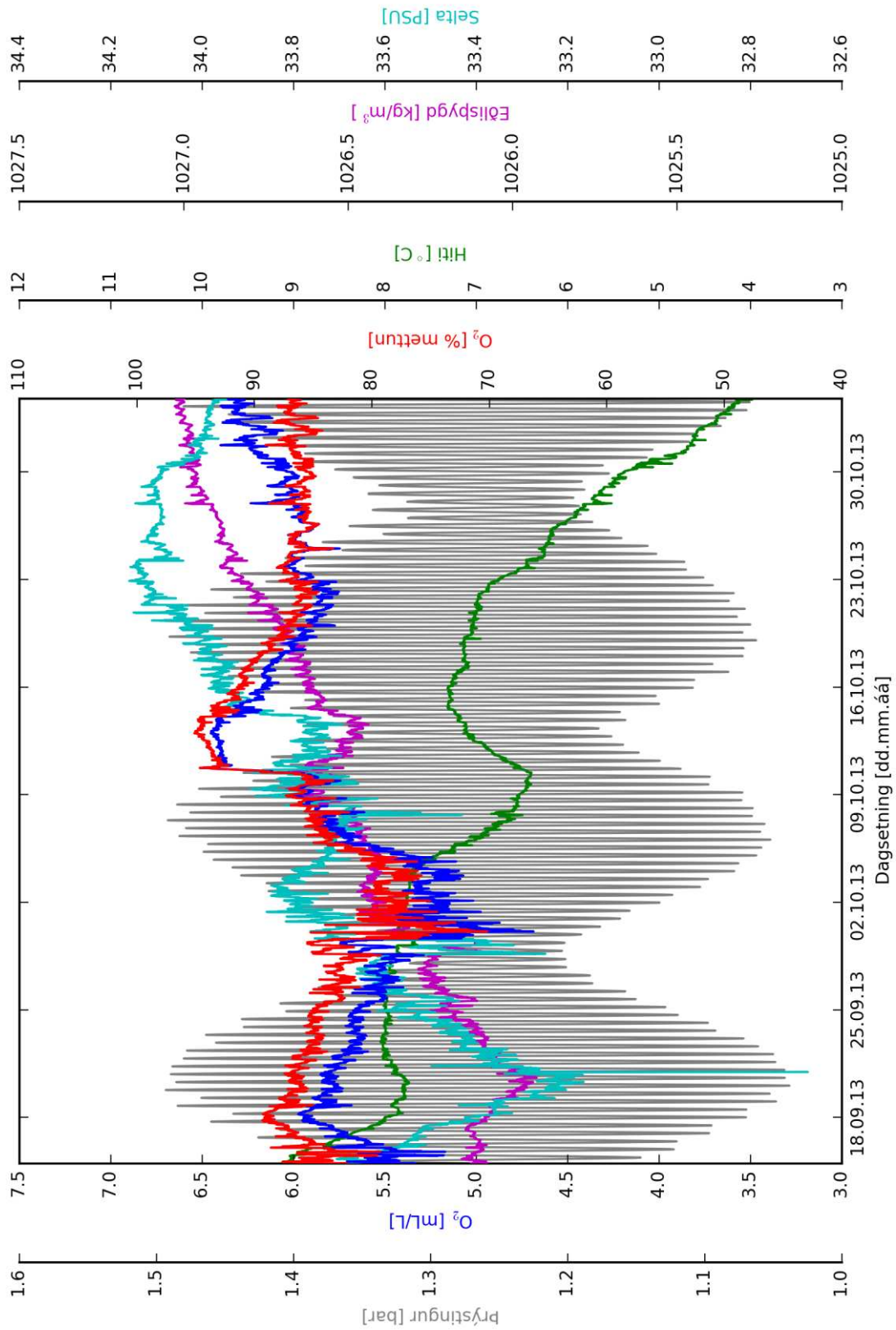
Mynd B. 2. Mælingar frá MicroCAT mæli við HFS.



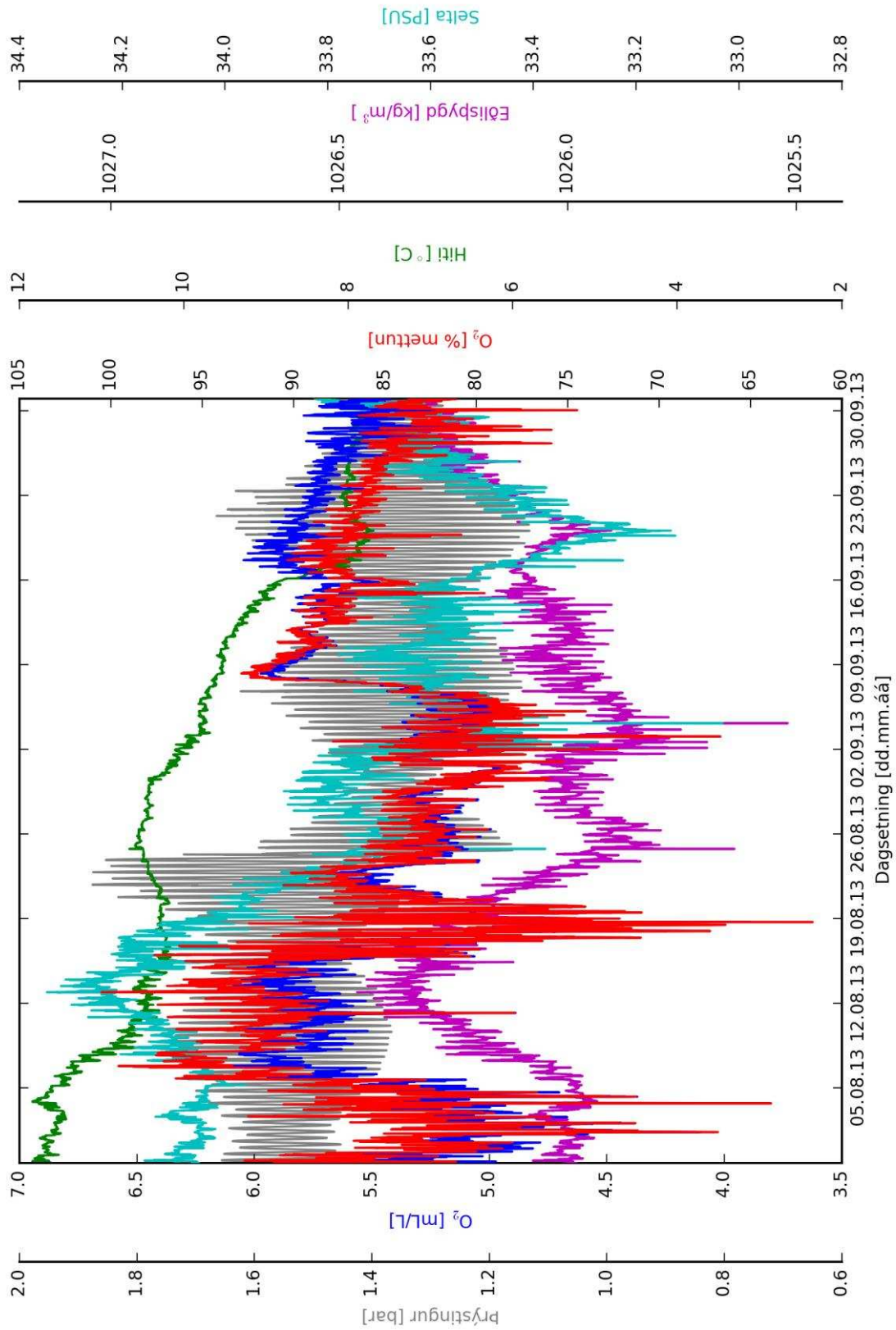
Mynd B. 3. Mælingar frá MicroCAT mæli við HNA.



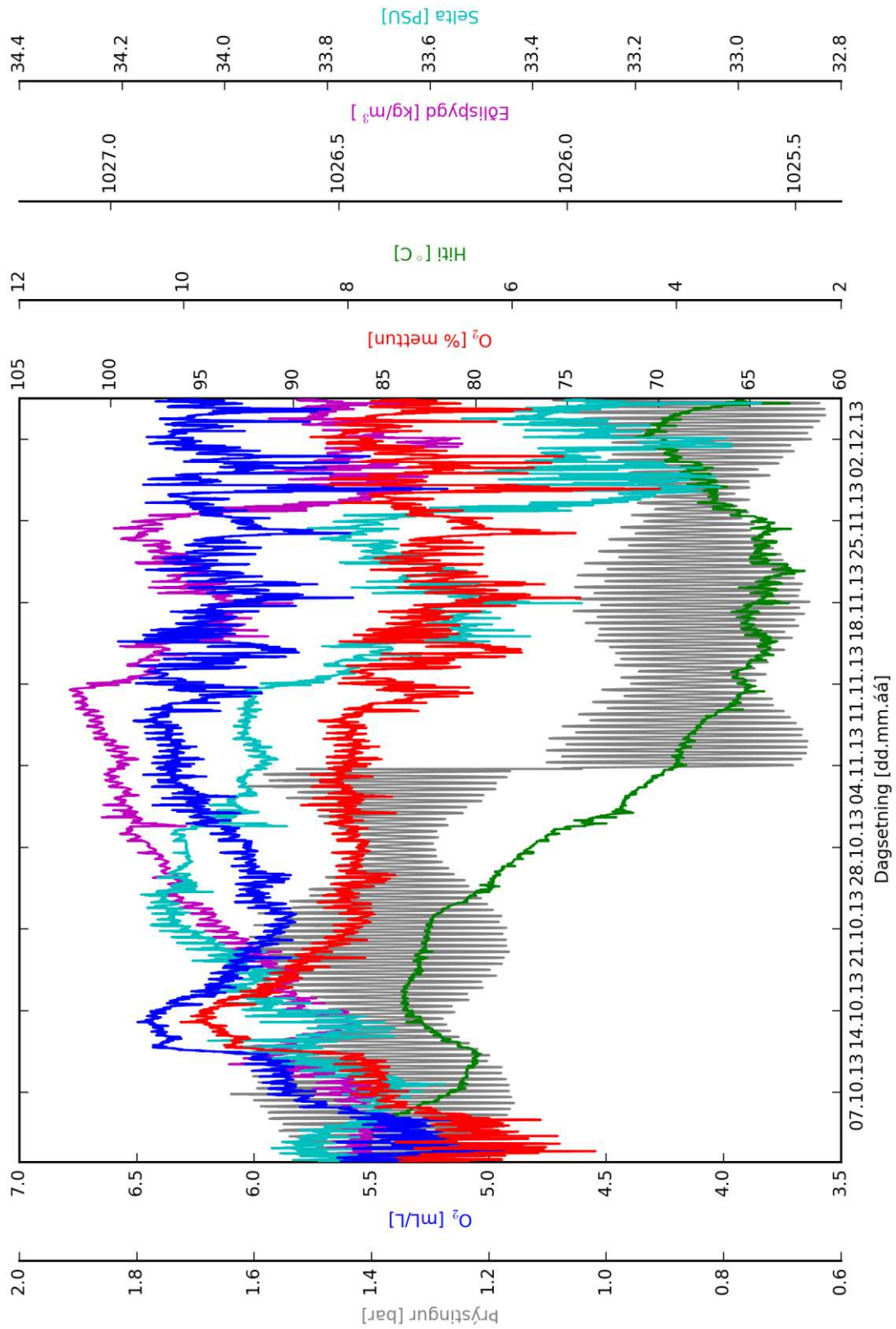
Mynd B. 4. Mælingar frá MicroCAT mæli við HNA.



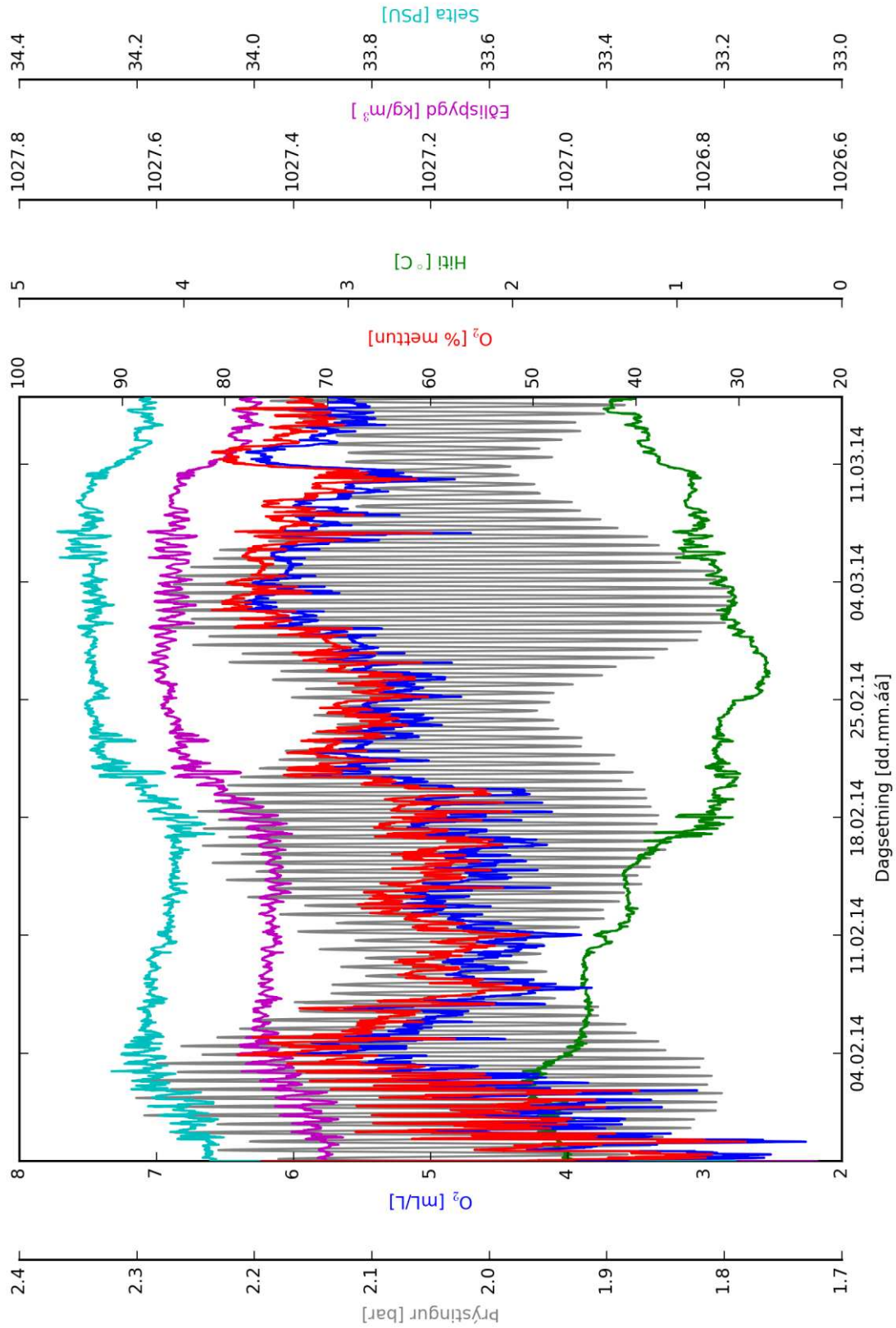
Mynd B. 5. Mælingar frá MicroCAT mæli við HNA.



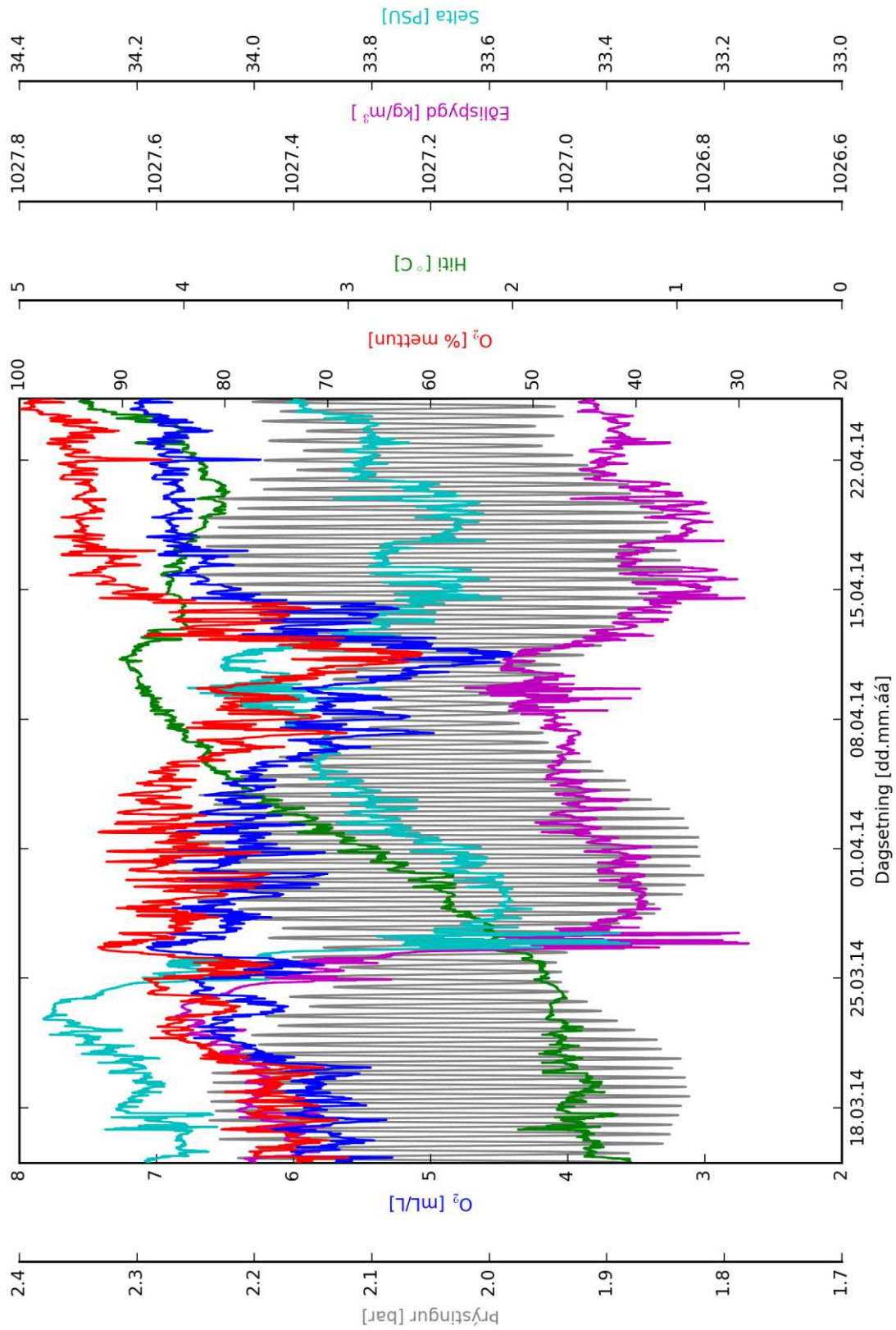
Mynd B. 6. Mælingar frá MicroCAT mæli við HSV.



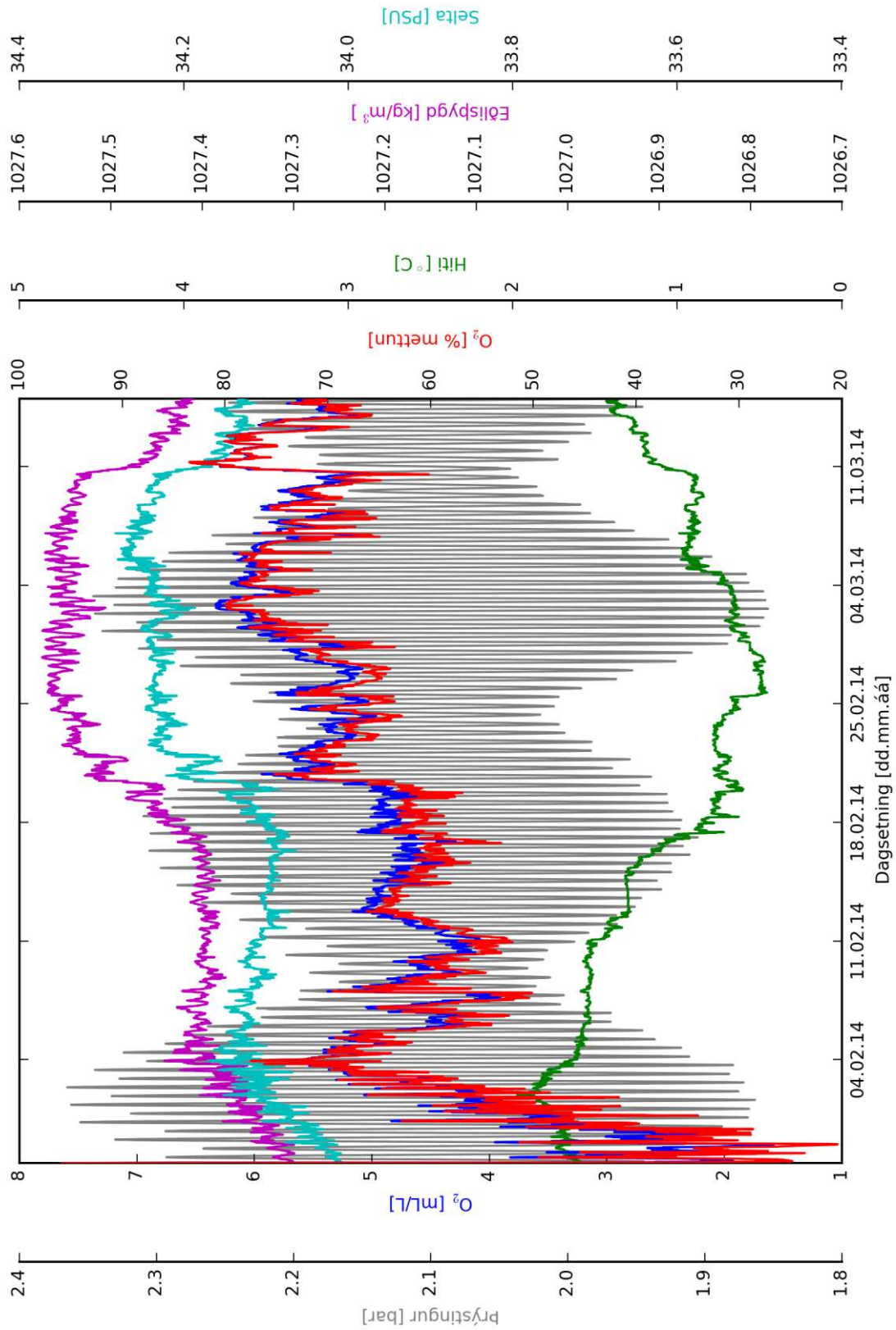
Mynd B. 7. Mælingar frá MicroCAT mæli við HSV.



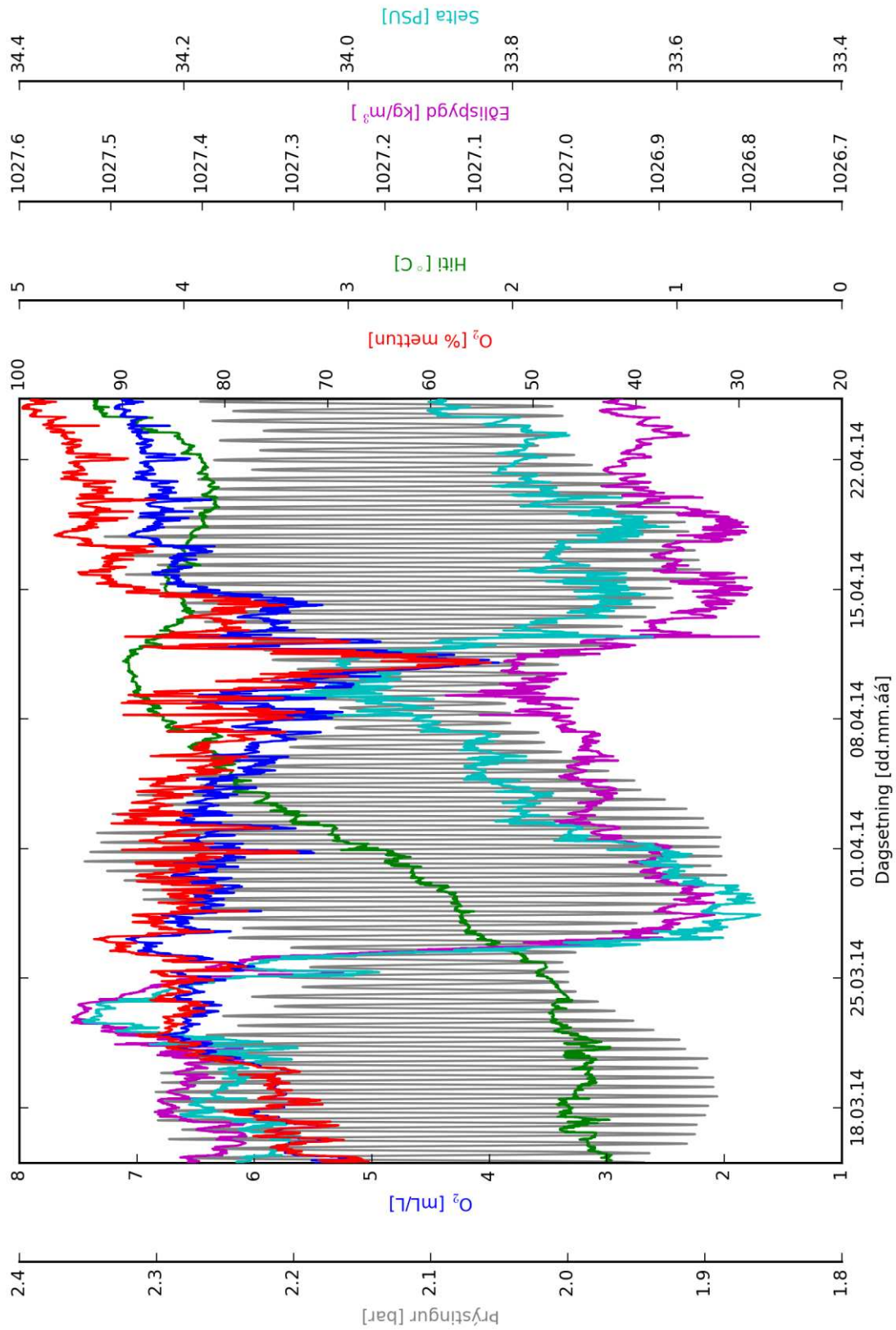
Mynd B. 8. Mælingar frá MicroCAT mæli við HFA.



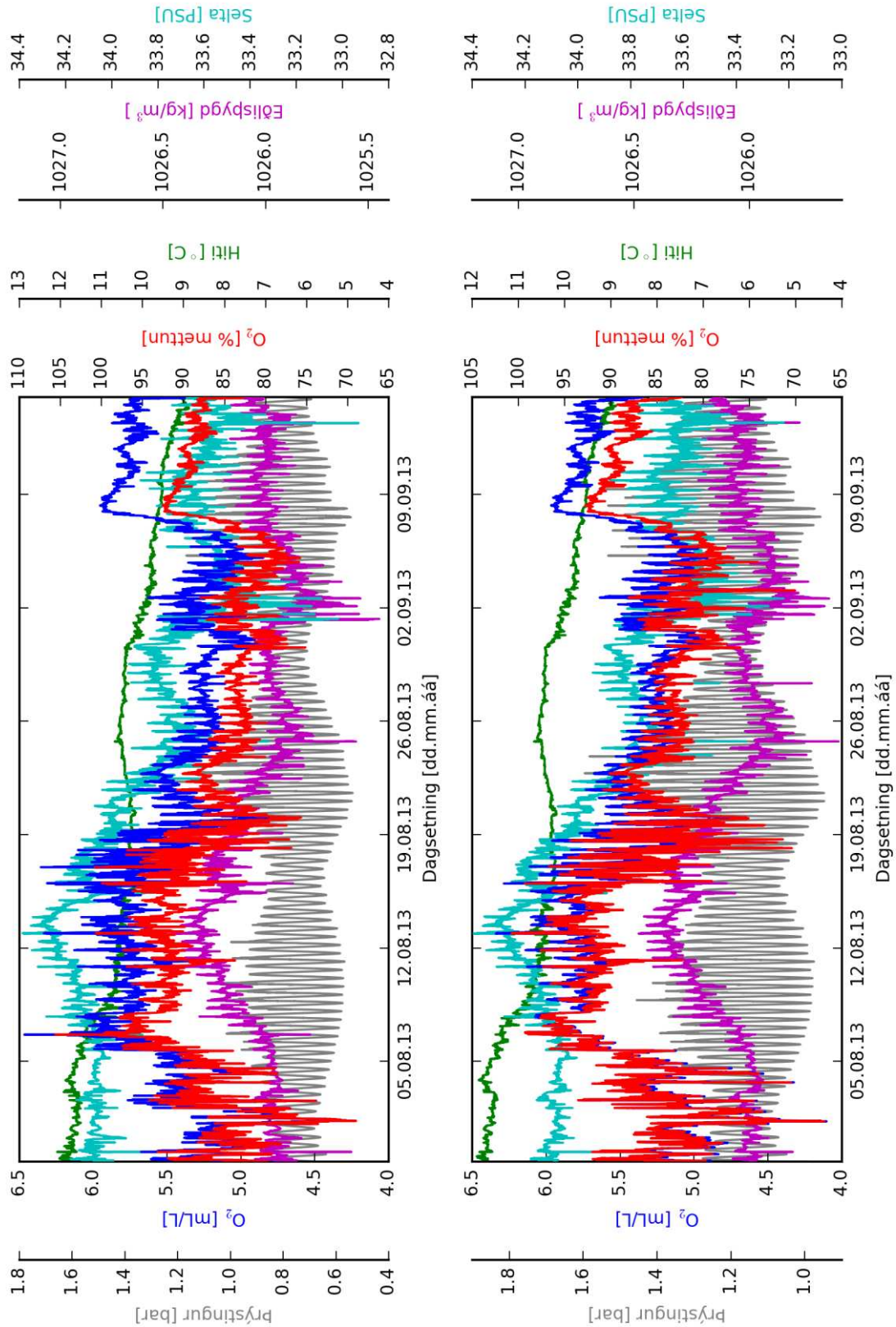
Mynd B. 9. Mælingar frá MicroCAT mæli við HFA.



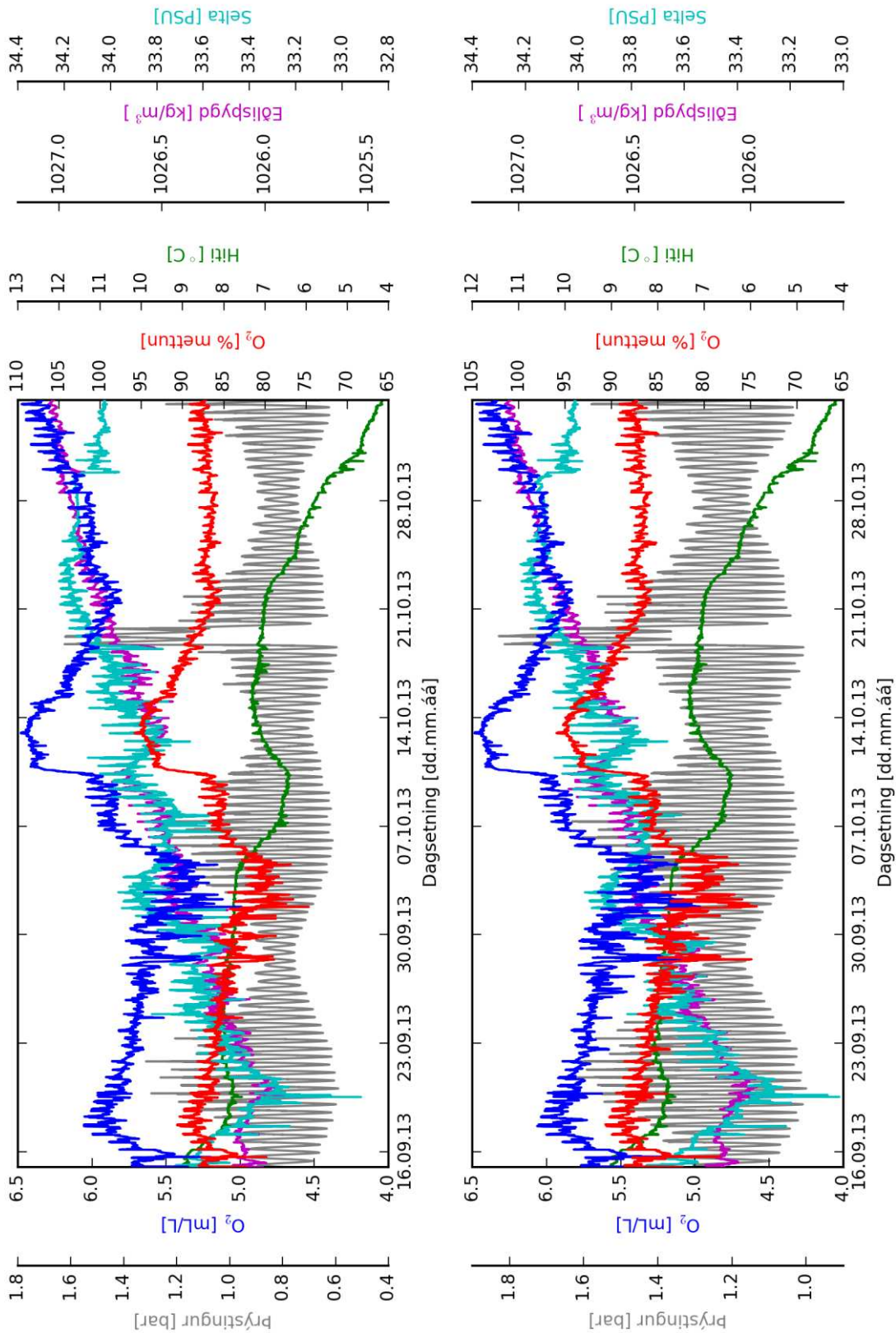
Mynd B. 10. Mælingar frá MicroCAT mæli við HFV.



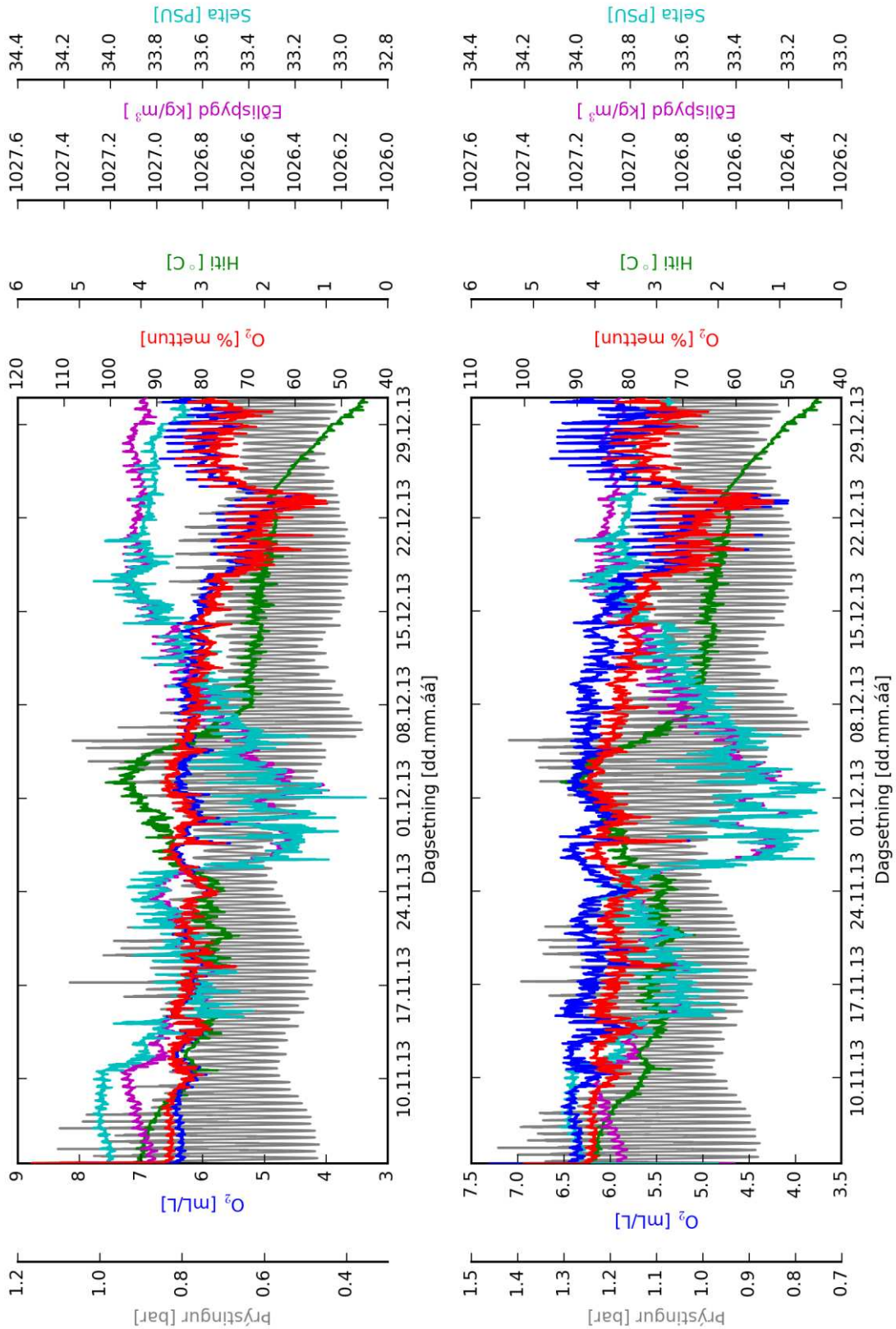
Mynd B. 11. Mælingar frá MicroCAT mæli við HFV.



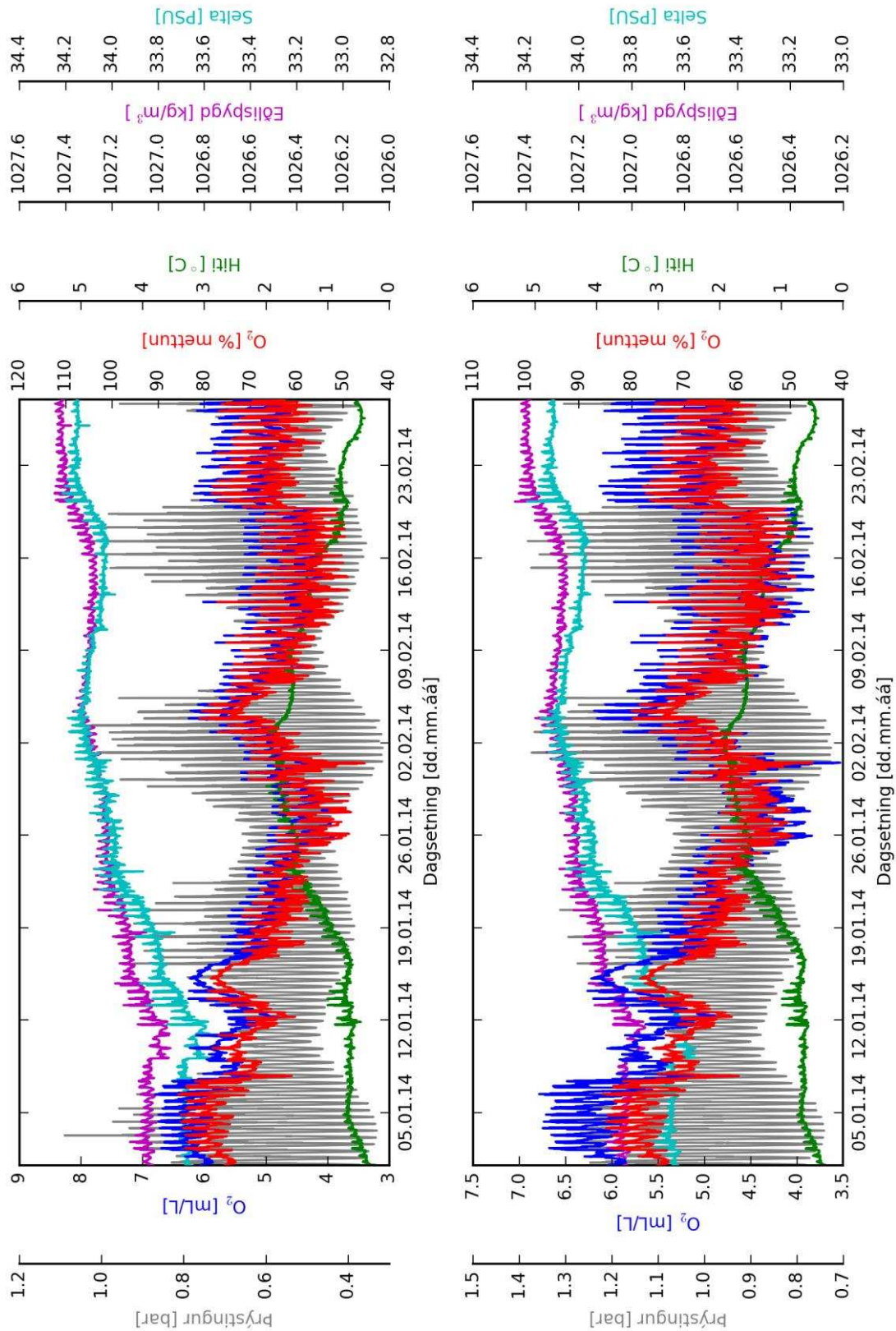
Mynd B. 12. Mælingar frá MicroCAT mæli við L1 efri (efra graf) og L1 neðri (neðra graf).



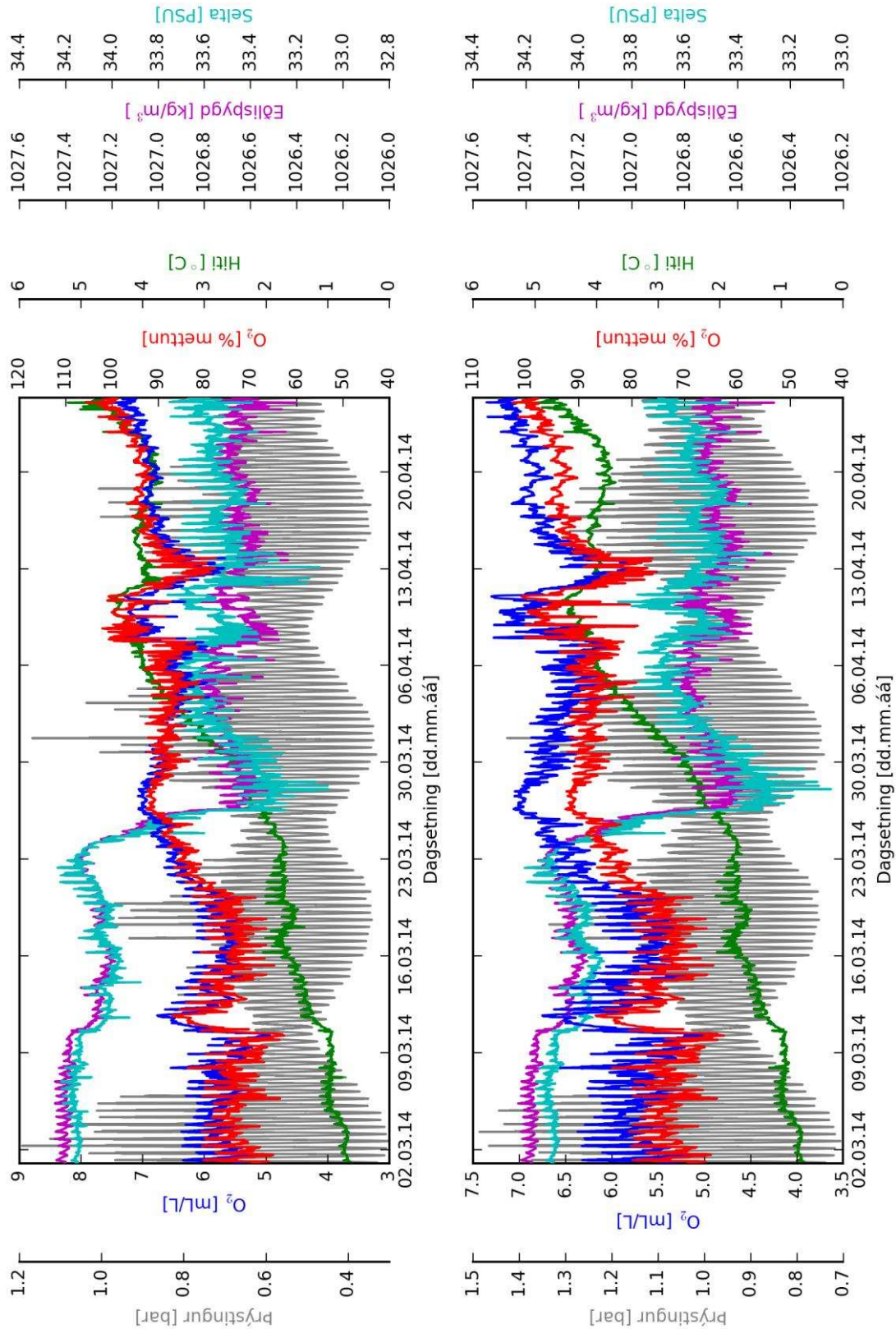
Mynd B. 13. Mælingar frá MicroCAT mæli við L1 efri (efra graf) og L1 neðri (neðra graf).



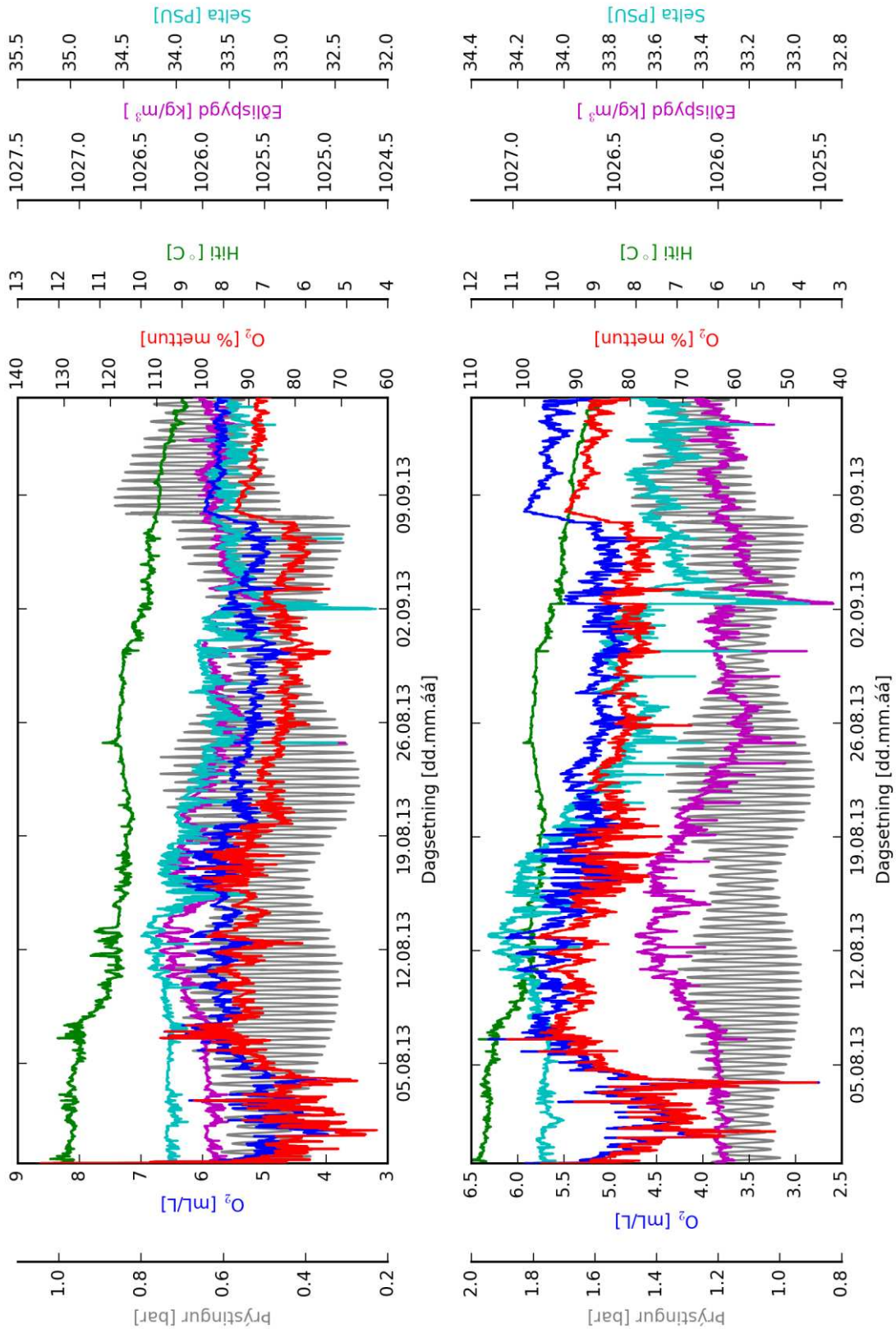
Mynd B. 14. Mælingar frá MicroCAT mæli við L1 efri (efra graf) og L1 neðri (neðra graf).



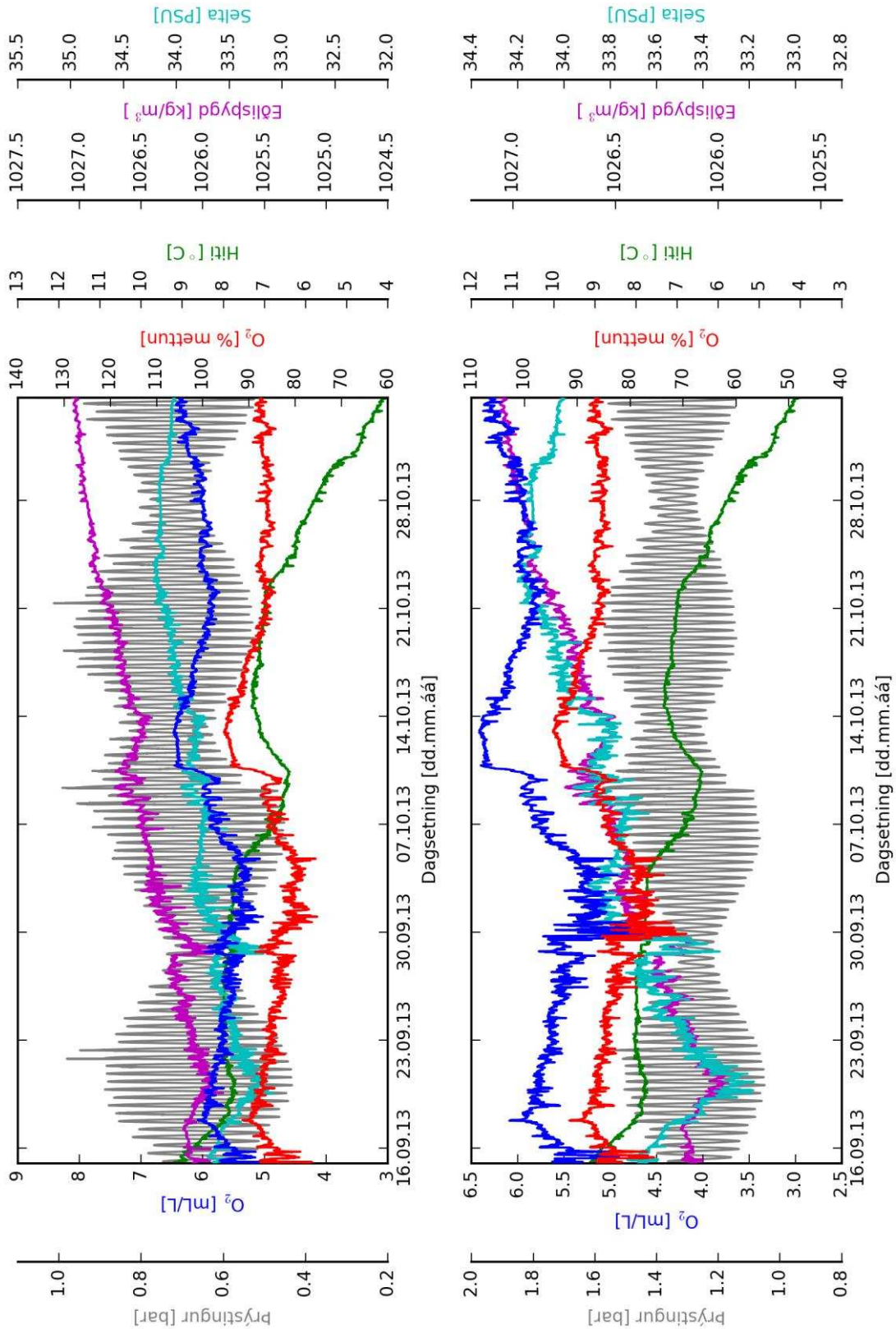
Mynd B. 15. Mælingar frá MicroCAT mæli við L1 efri (efra graf) og L1 neðri (neðra graf).



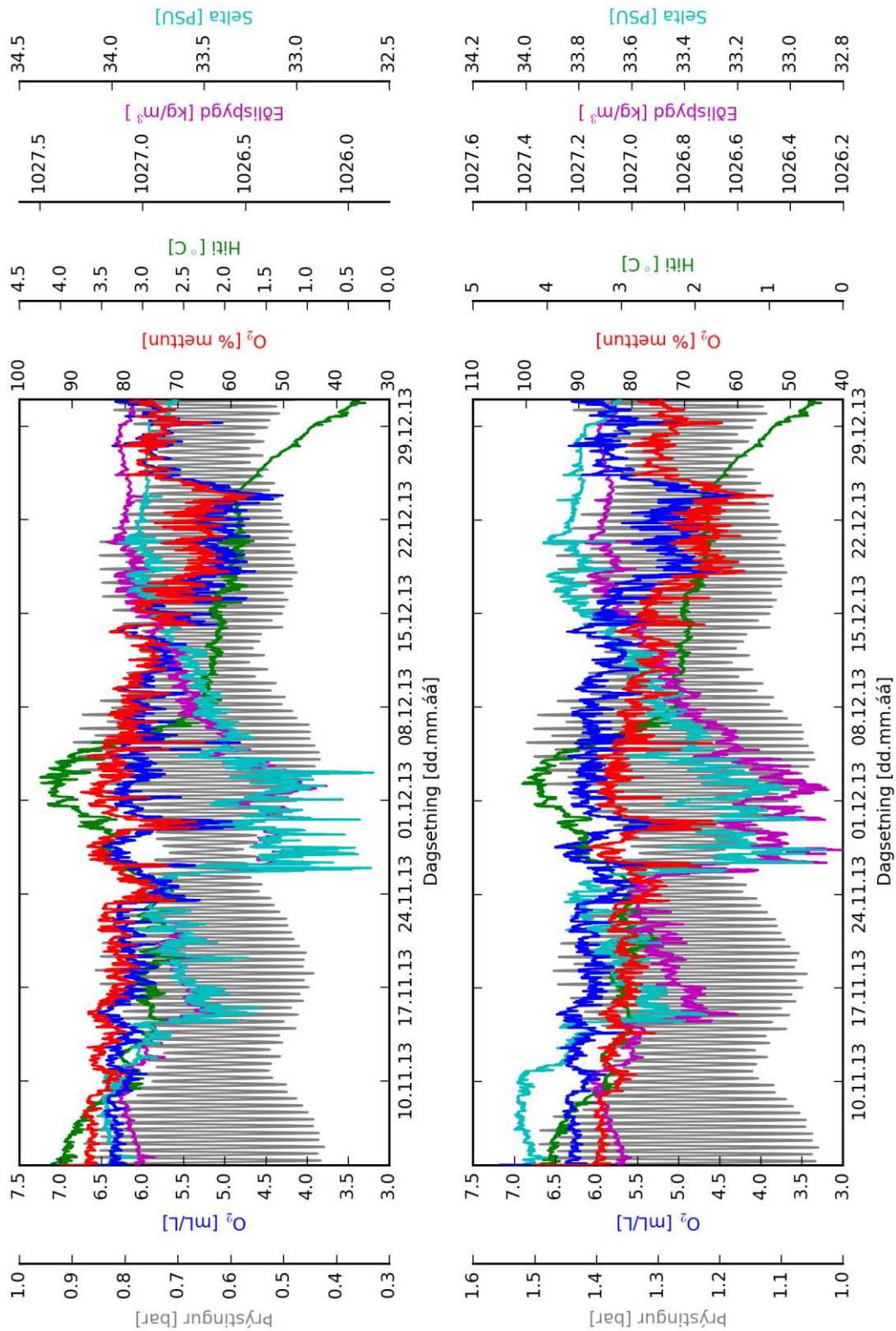
Mynd B. 16. Mælingar frá MicroCAT mæli við L1 efri (efra graf) og L1 neðri (neðra graf).



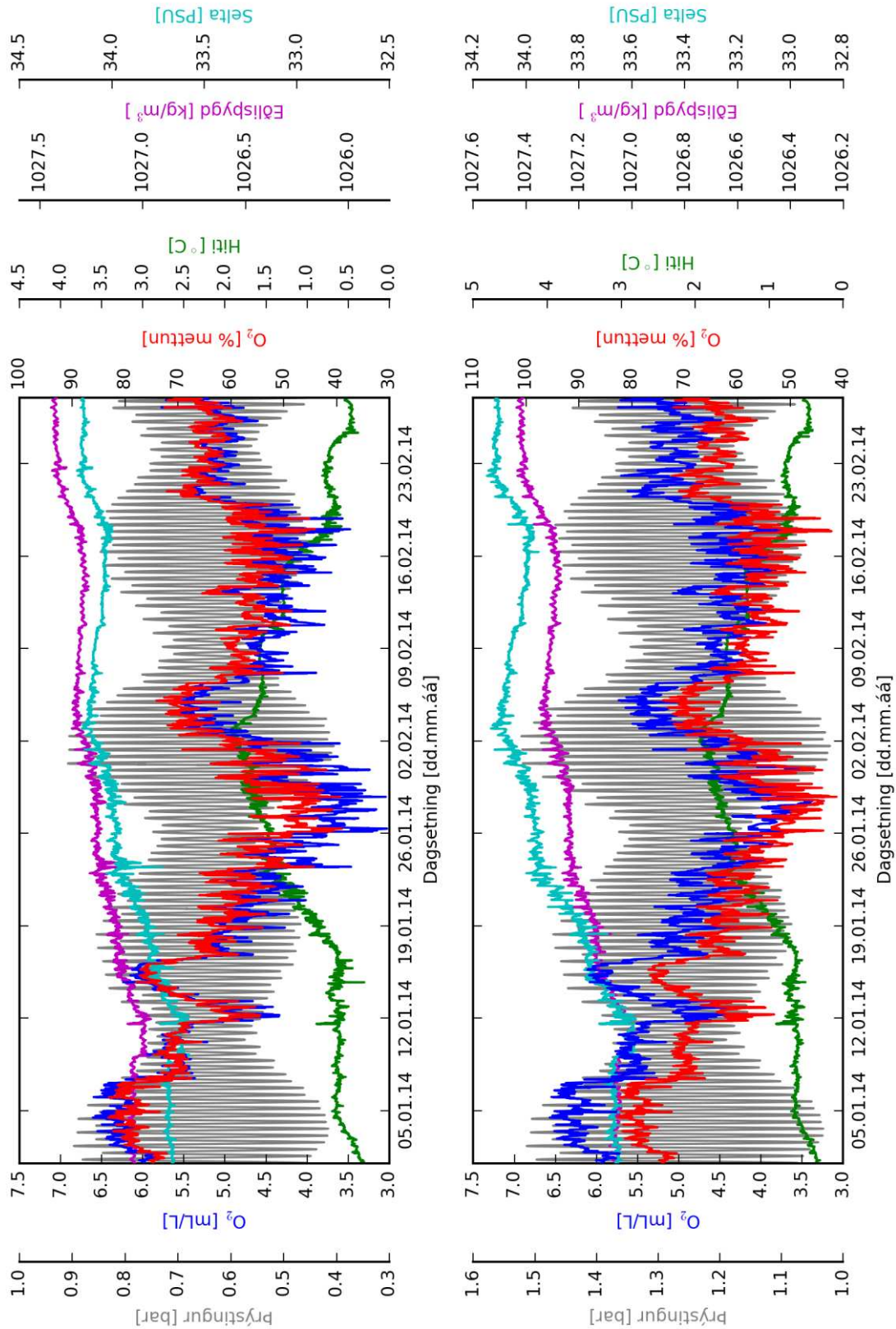
Mynd B. 17. Mælingar frá MicroCAT mæli við L2 efri (efra graf) og L2 neðri (neðra graf).



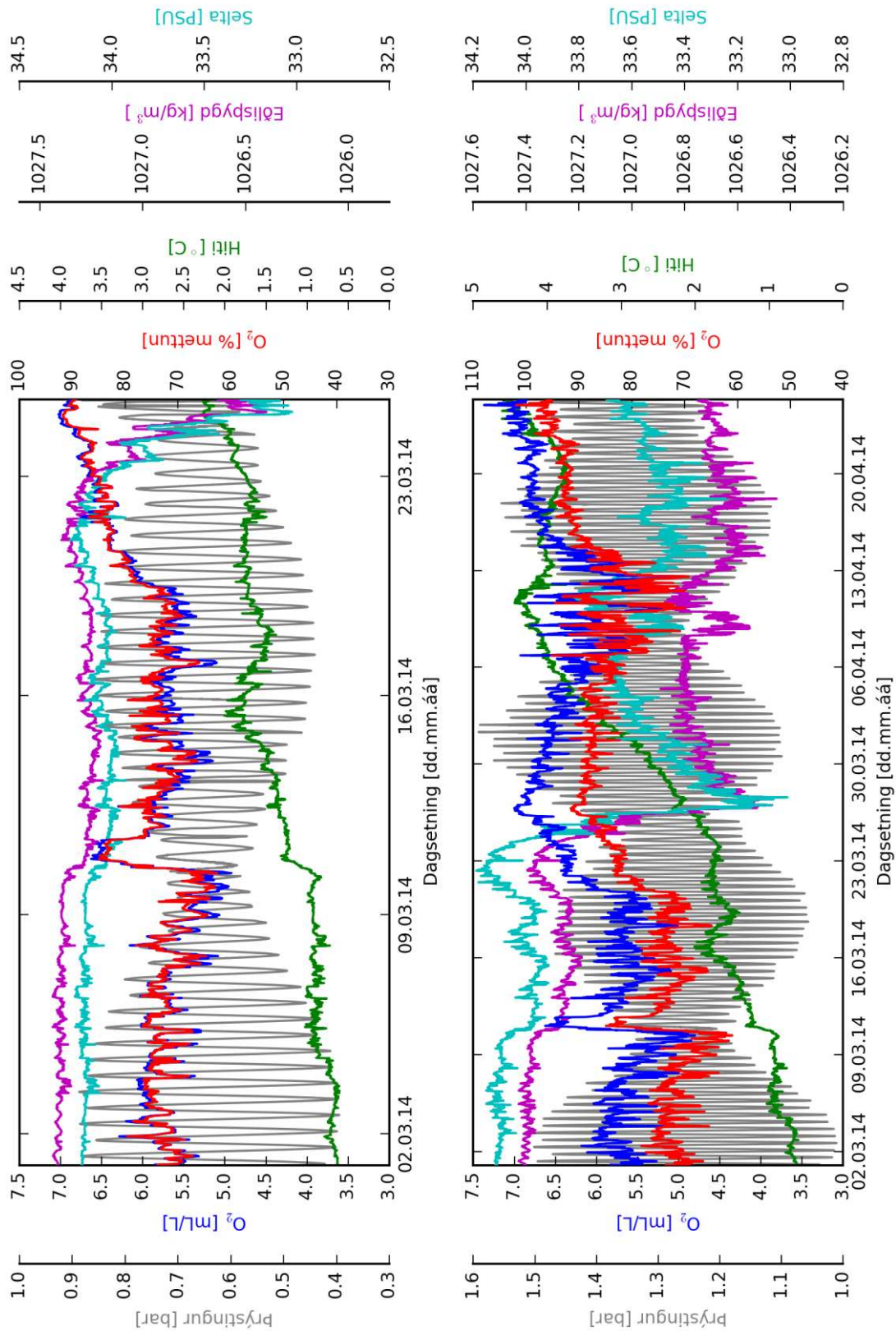
Mynd B. 18. Mælingar frá MicroCAT mæli við L2 efri (efra graf) og L2 neðri (neðra graf).



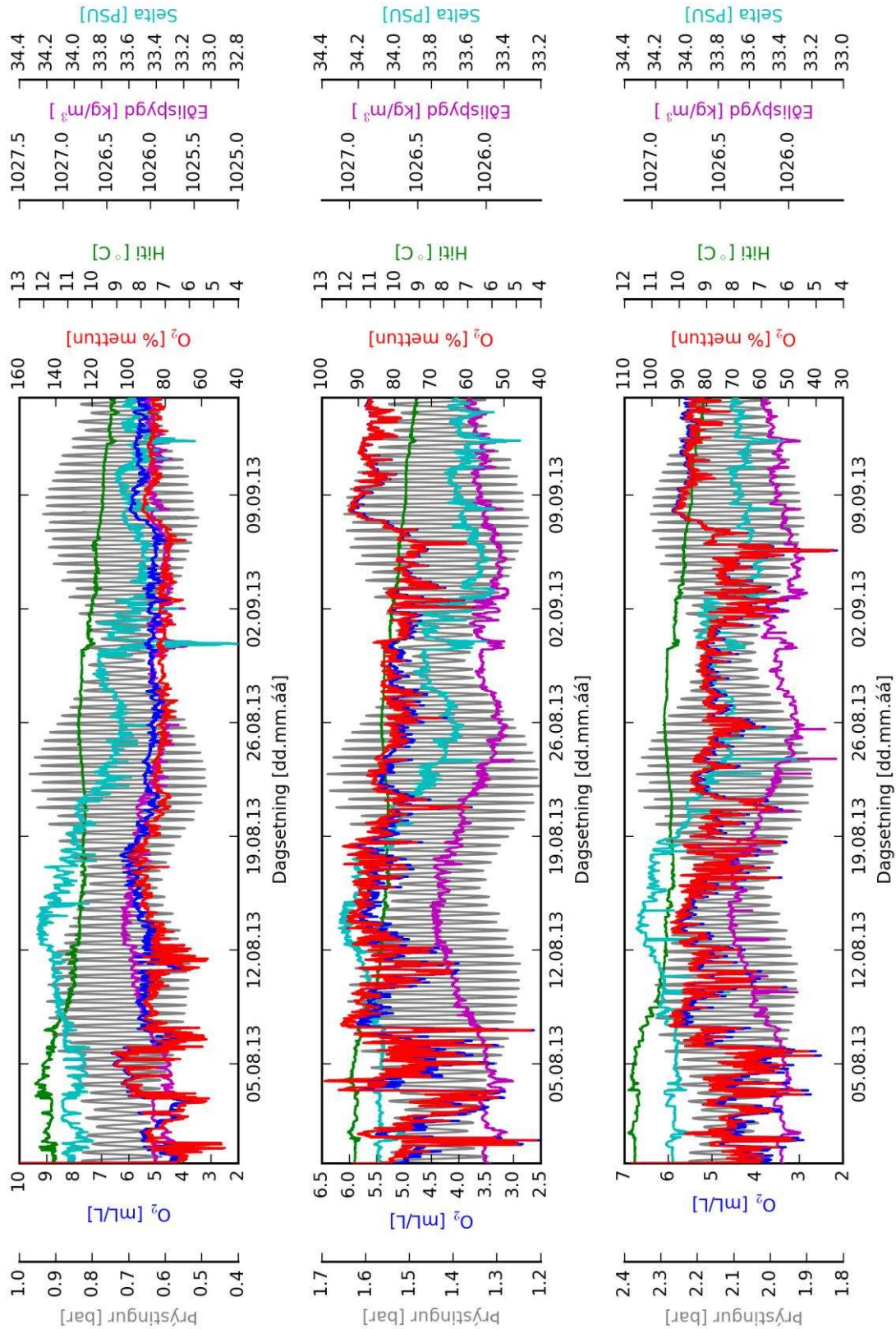
Mynd B. 19. Mælingar frá MicroCAT mæli við L2 efri (efra graf) og L2 neðri (neðra graf).



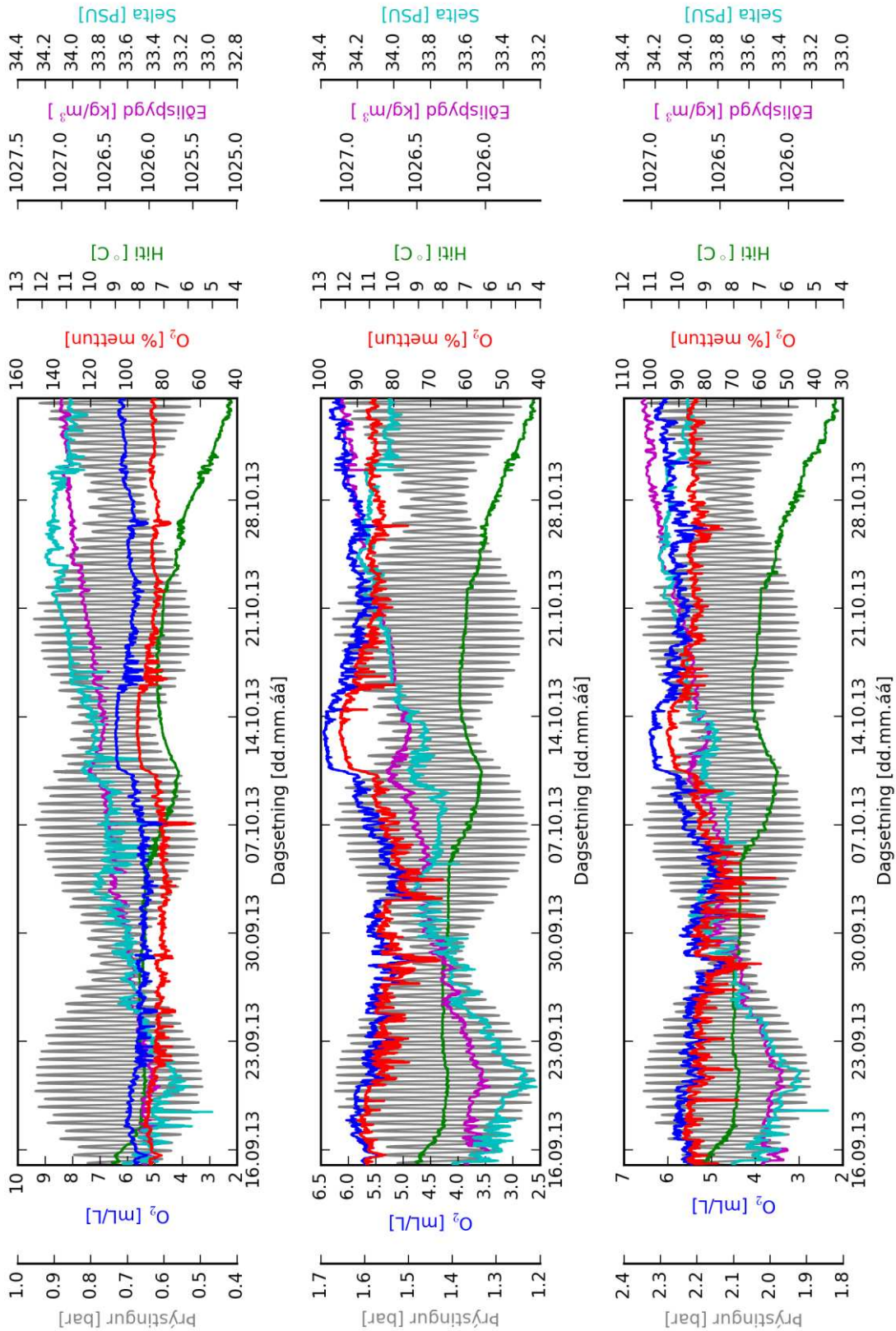
Mynd B. 20. Mælingar frá MicroCAT mæli við L2 efri (efra graf) og L2 neðri (neðra graf).



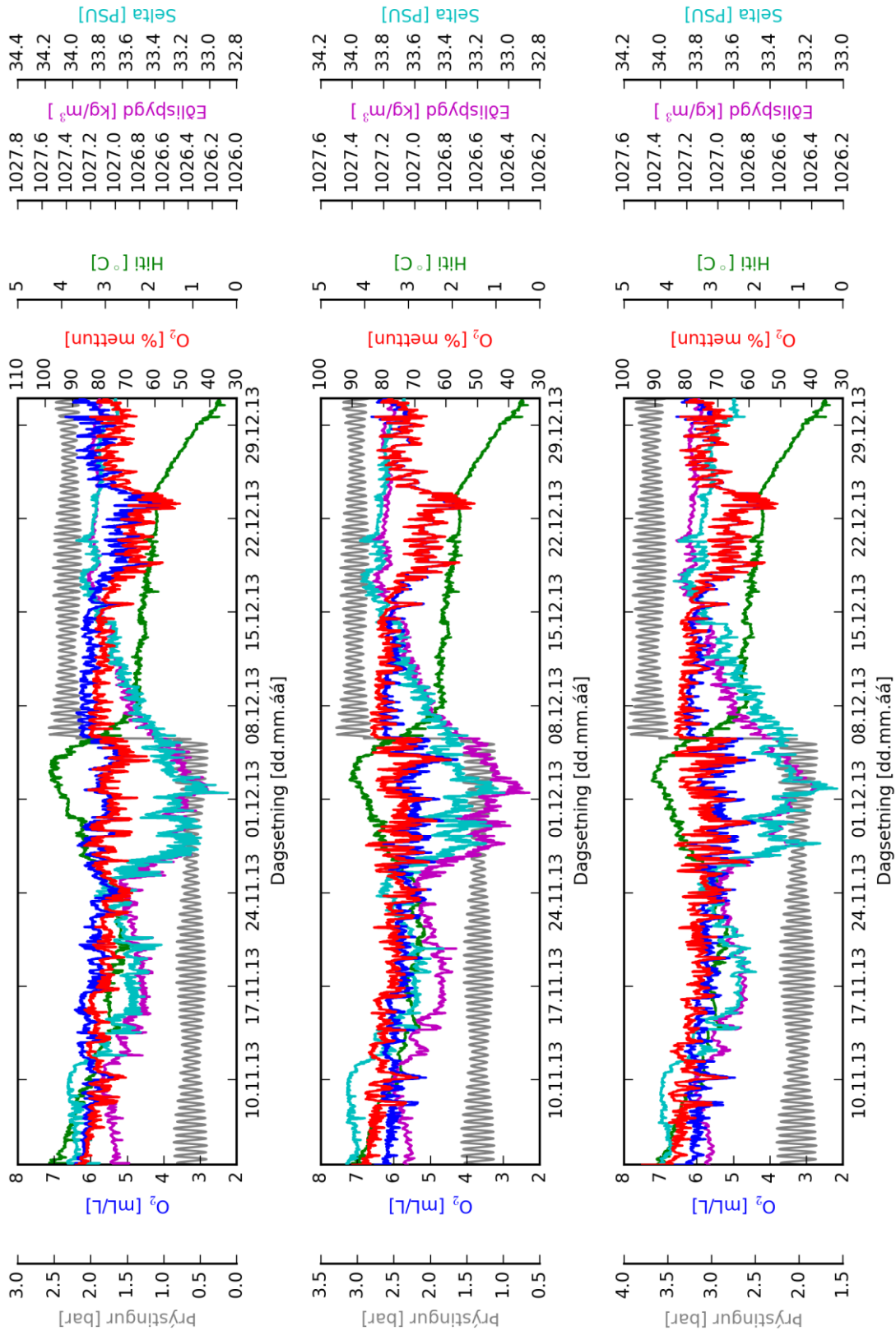
Mynd B. 21. Mælingar frá MicroCAT mæli við L2 efri (efra graf) og L2 neðri (neðra graf).



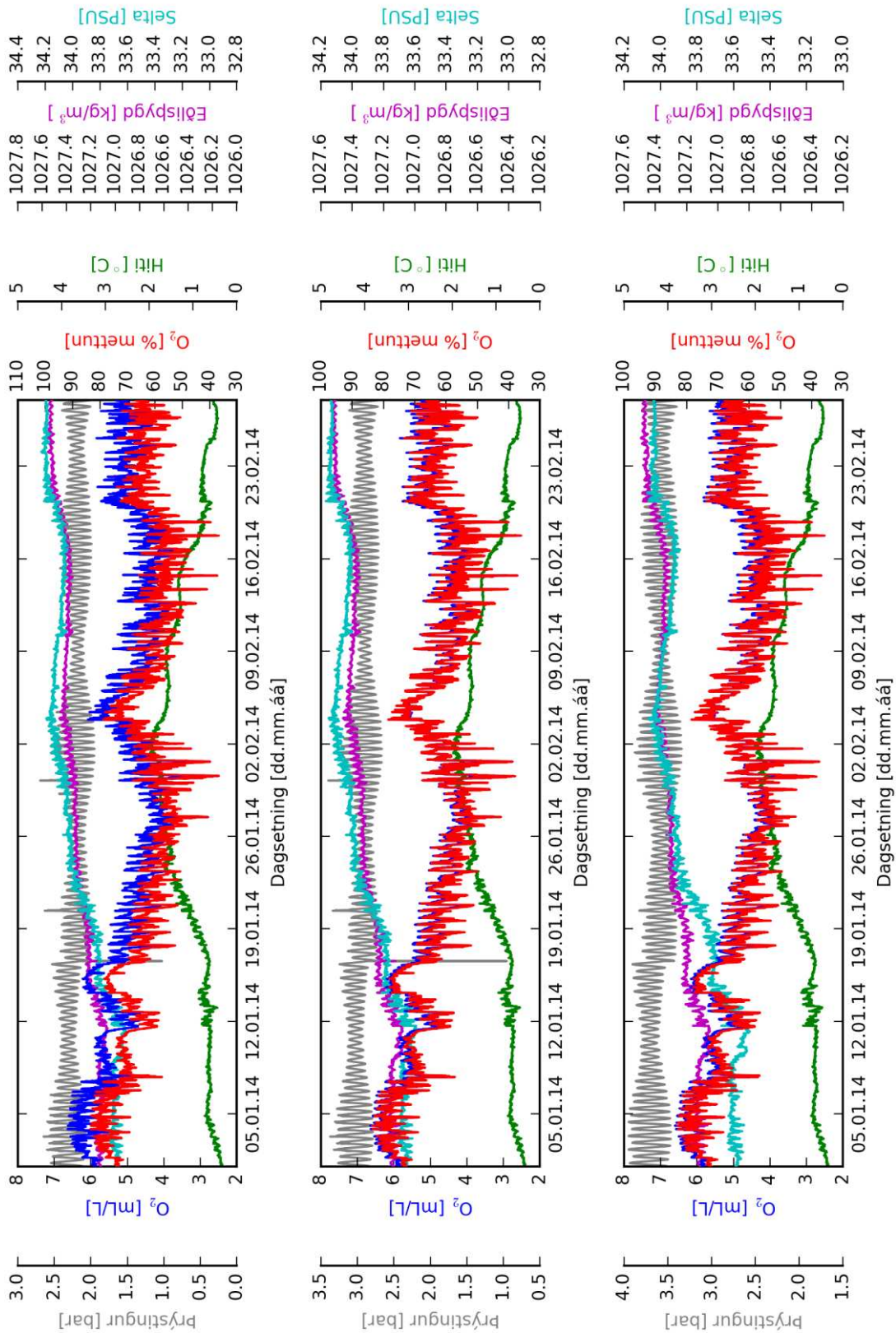
Mynd B. 22. Mælingar frá MicroCAT mæli við L3 efri (efsta graf), L3 mið (miðju graf) og L3 neðri (neðsta graf).



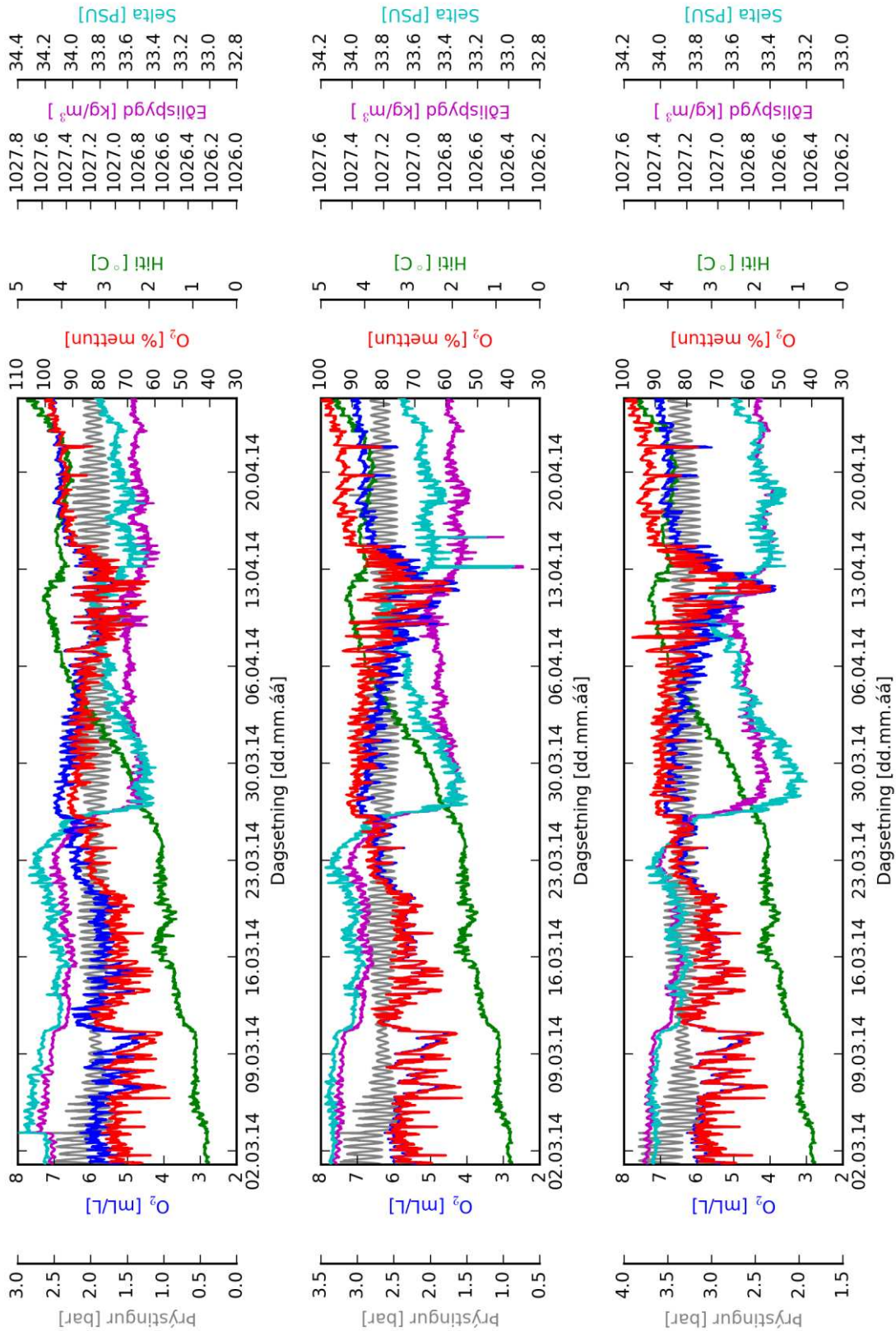
Mynd B. 23. Mælingar frá MicroCAT mæli við L3 efri (efsta graf), L3 mið (miðju graf) og L3 neðri (neðsta graf).



Mynd B. 24. Mælingar frá MicroCAT mæli við L3 efri (efsta graf), L3 mið (miðju graf) og L3 neðri (neðsta graf).

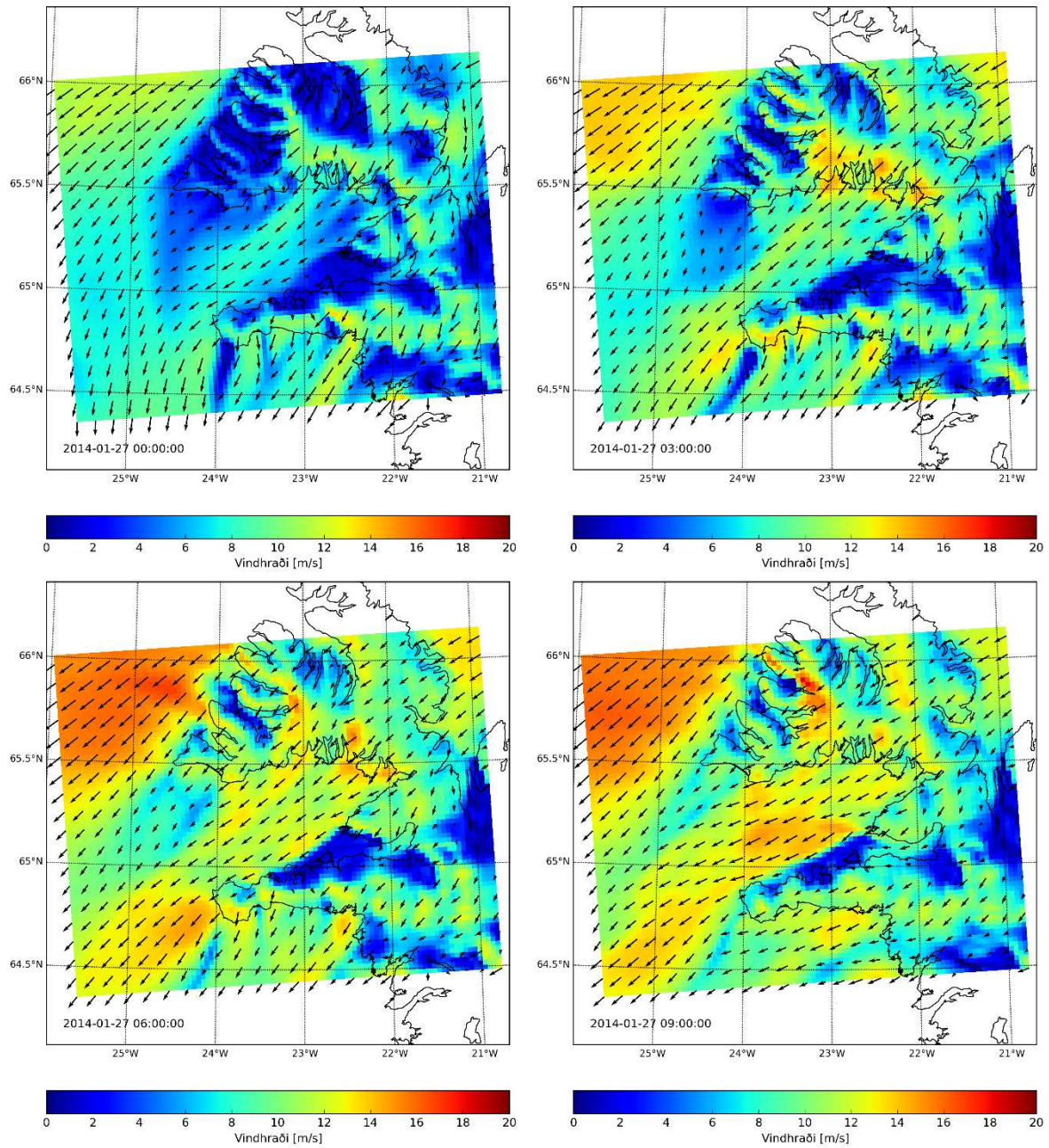


Mynd B. 25. Mælingar frá MicroCAT mæli við L3 efri (efsta graf), L3 mið (miðju graf) og L3 neðri (neðsta graf).

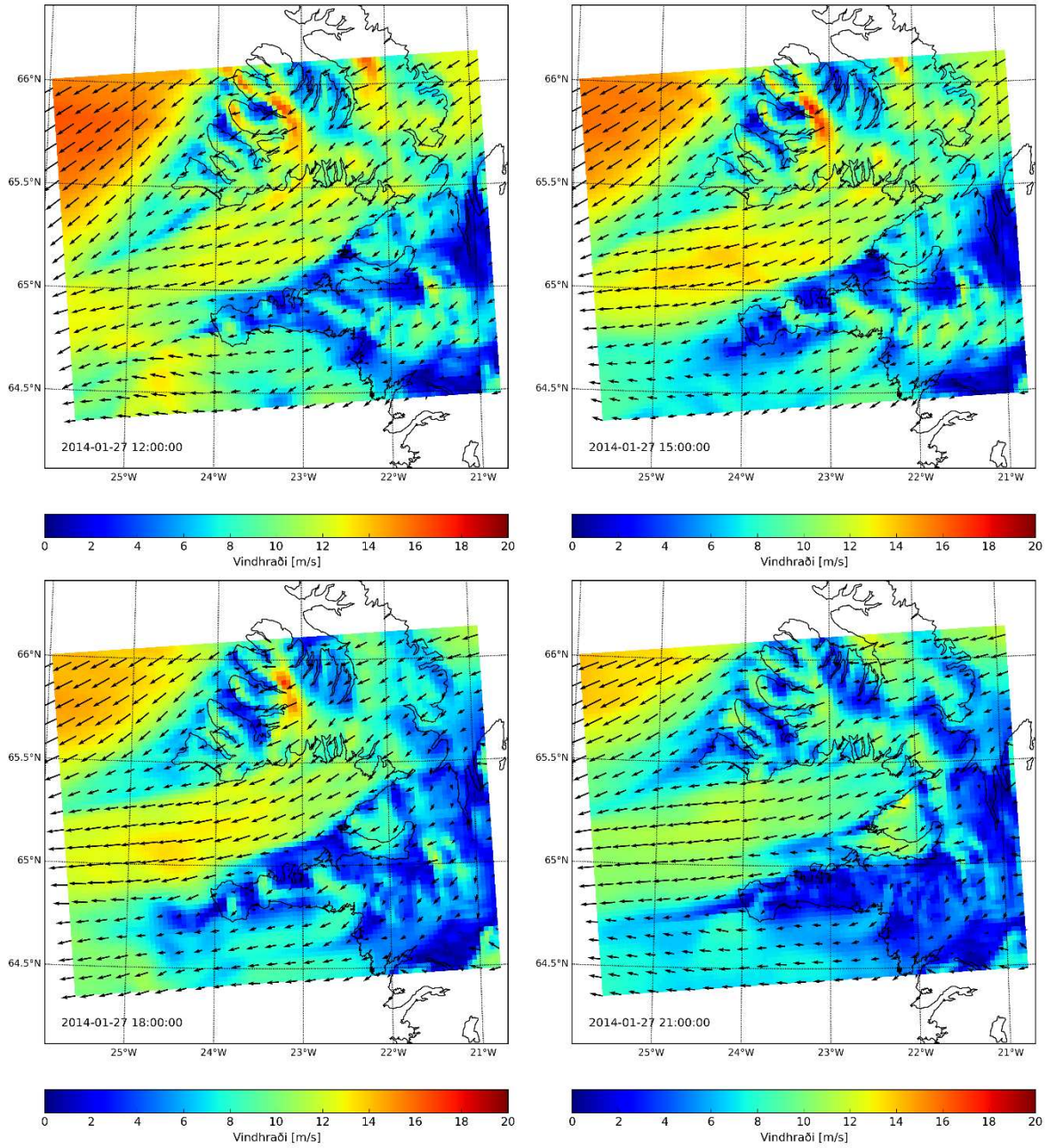


Mynd B. 26. Mælingar frá MicroCAT mæli við L3 efri (efsta graf), L3 mið (miðju graf) og L3 neðri (neðsta graf).

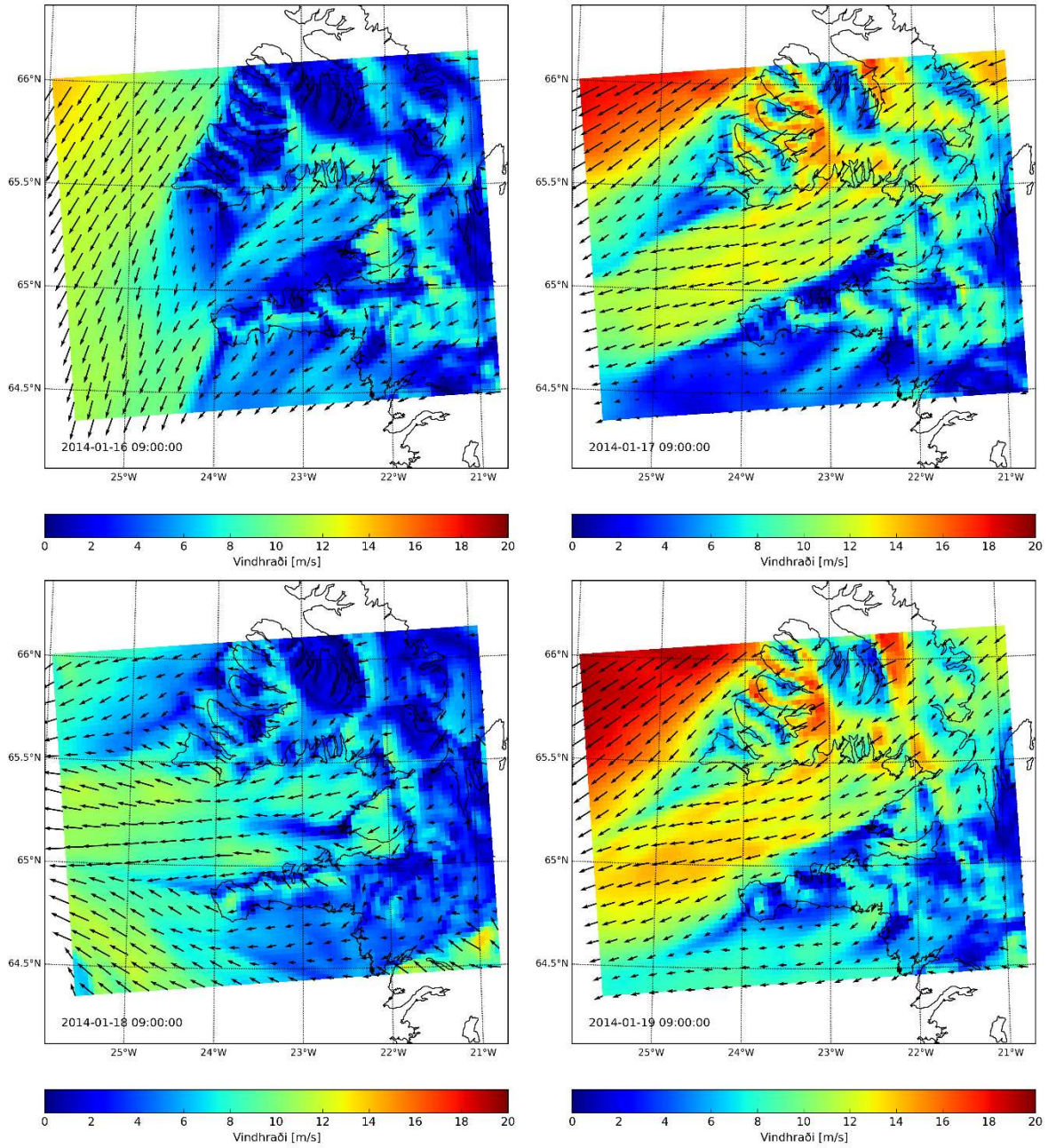
C. Veðurlíkanreikningar



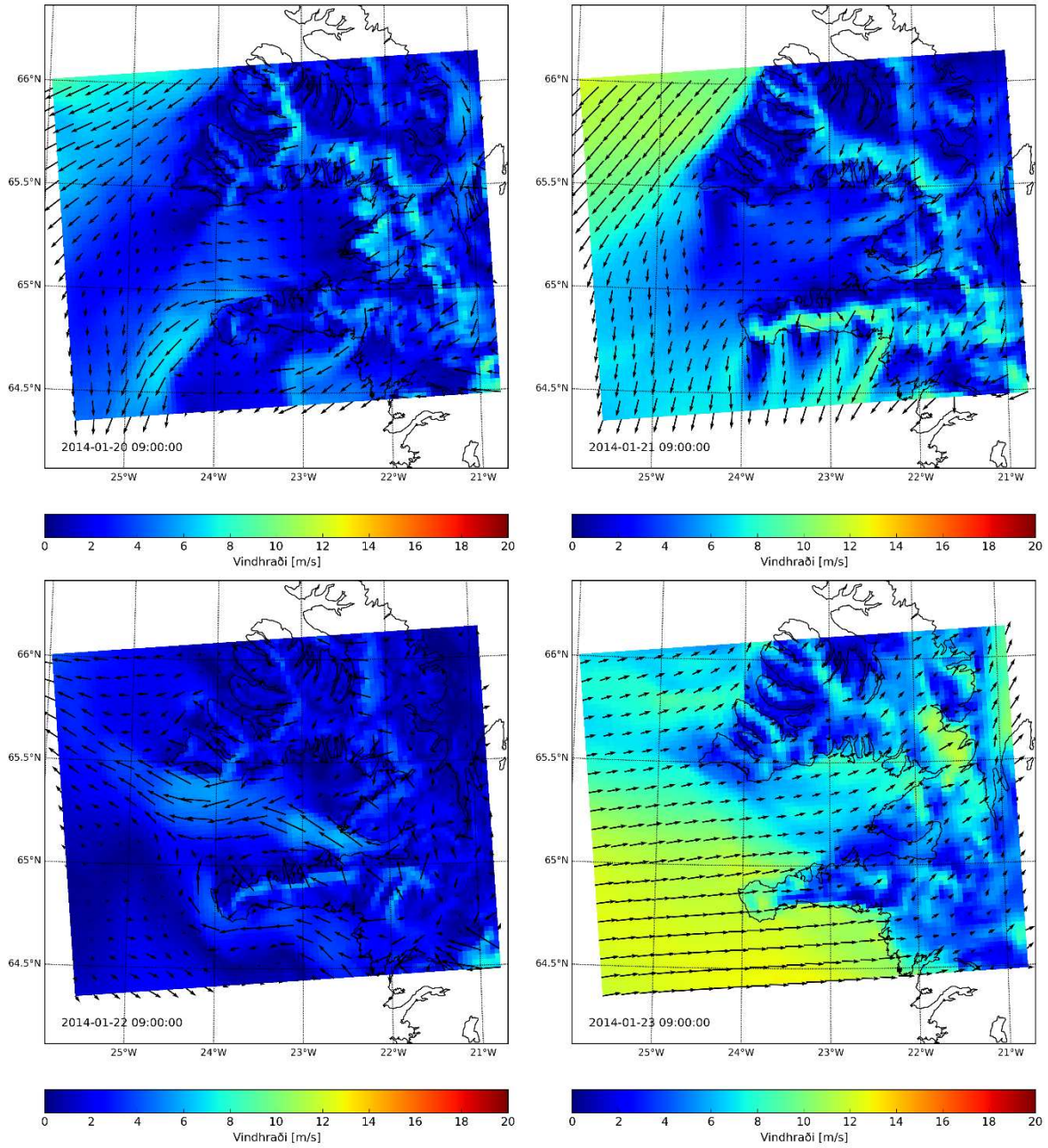
Mynd C. 1. Breytileiki veðurs skv. veðurlíkani Veðurstofunnar, Harmonie. 27. janúar 2014 00:00 – 09:00.



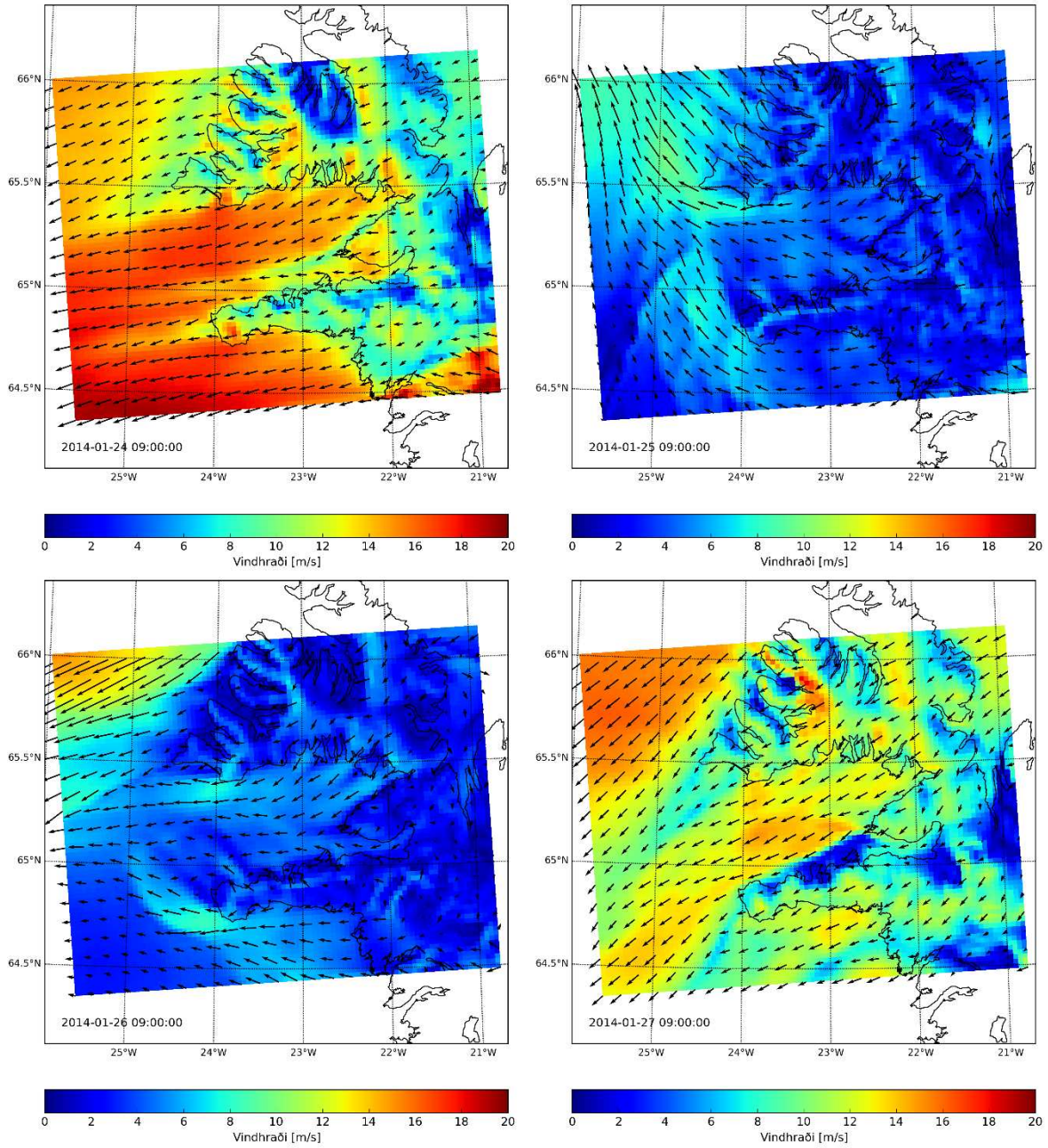
Mynd C. 2. Breytileiki veðurs skv. veðurlíkani Veðurstofunnar, Harmonie. 27. janúar 2014 12:00 – 21:00.



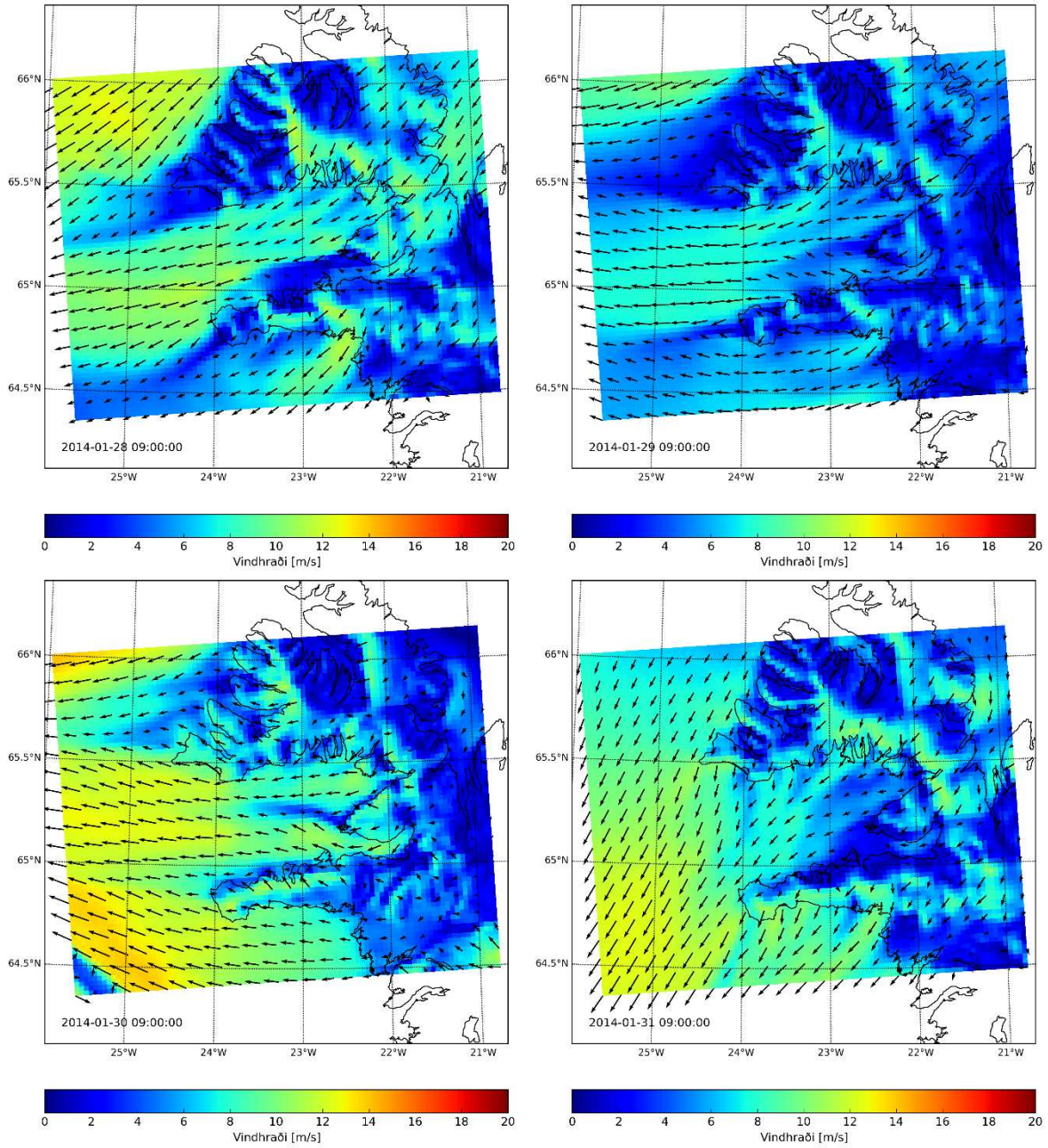
Mynd C. 3. Breytileiki veðurs skv. veðurlíkani Veðurstofunnar, Harmonie. 16. janúar 2014 9:00 – 19. janúar 2014 9:00.



Mynd C. 4. Breytileiki veðurs skv. veðurlíkani Veðurstofunnar, Harmonie. 20. janúar 2014 9:00 – 23. janúar 2014 9:00.

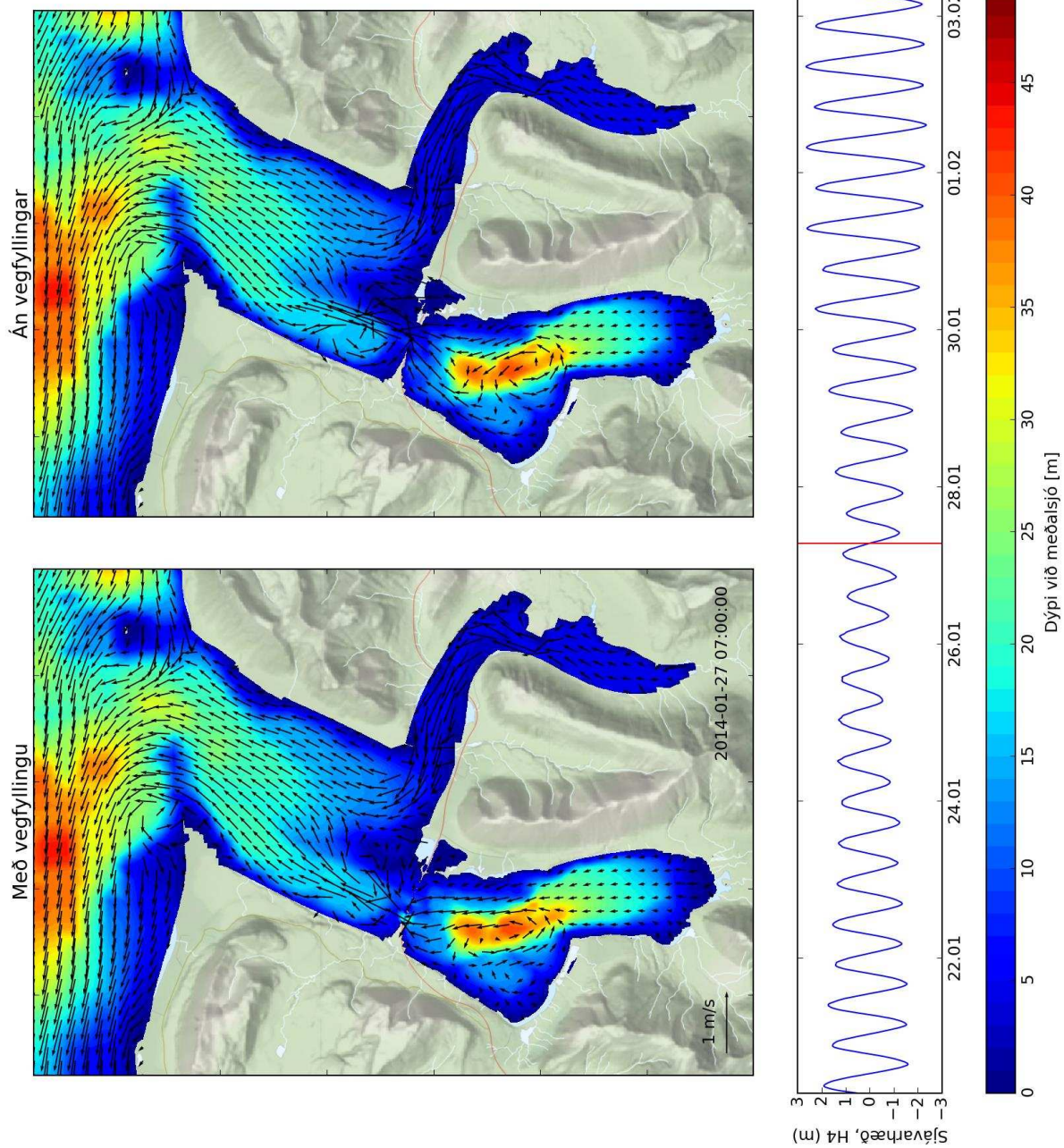


Mynd C. 5. Breytileiki veðurs skv. veðurlíkani Veðurstofunnar, Harmonie. 24. janúar 2014 9:00–27. janúar 2014 9:00.

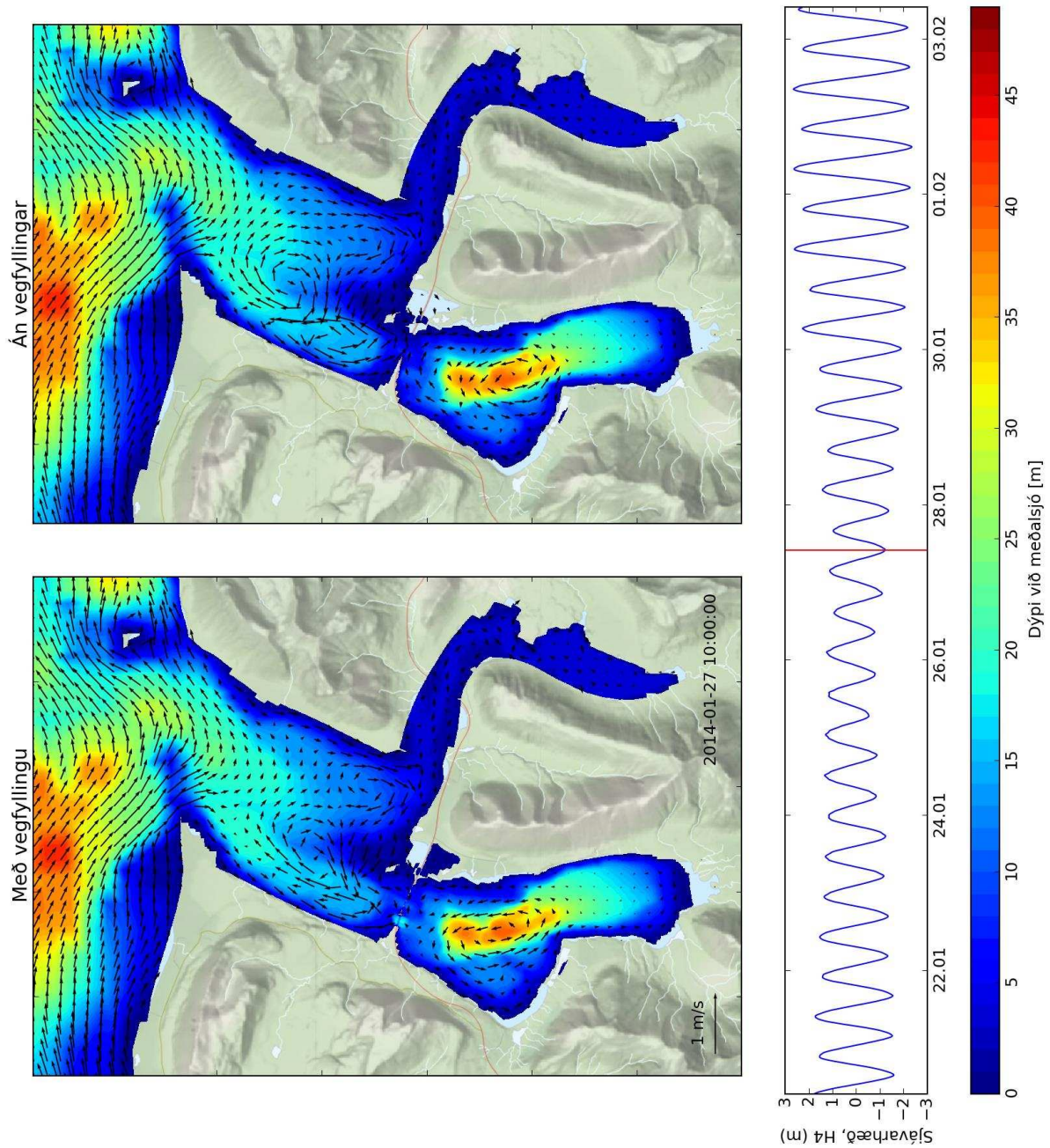


Mynd C. 6. Breytileiki veðurs skv. veðurlíkani Veðurstofunnar, Harmonie. 28. janúar 2014 9:00 – 31. janúar 2014 9:00.

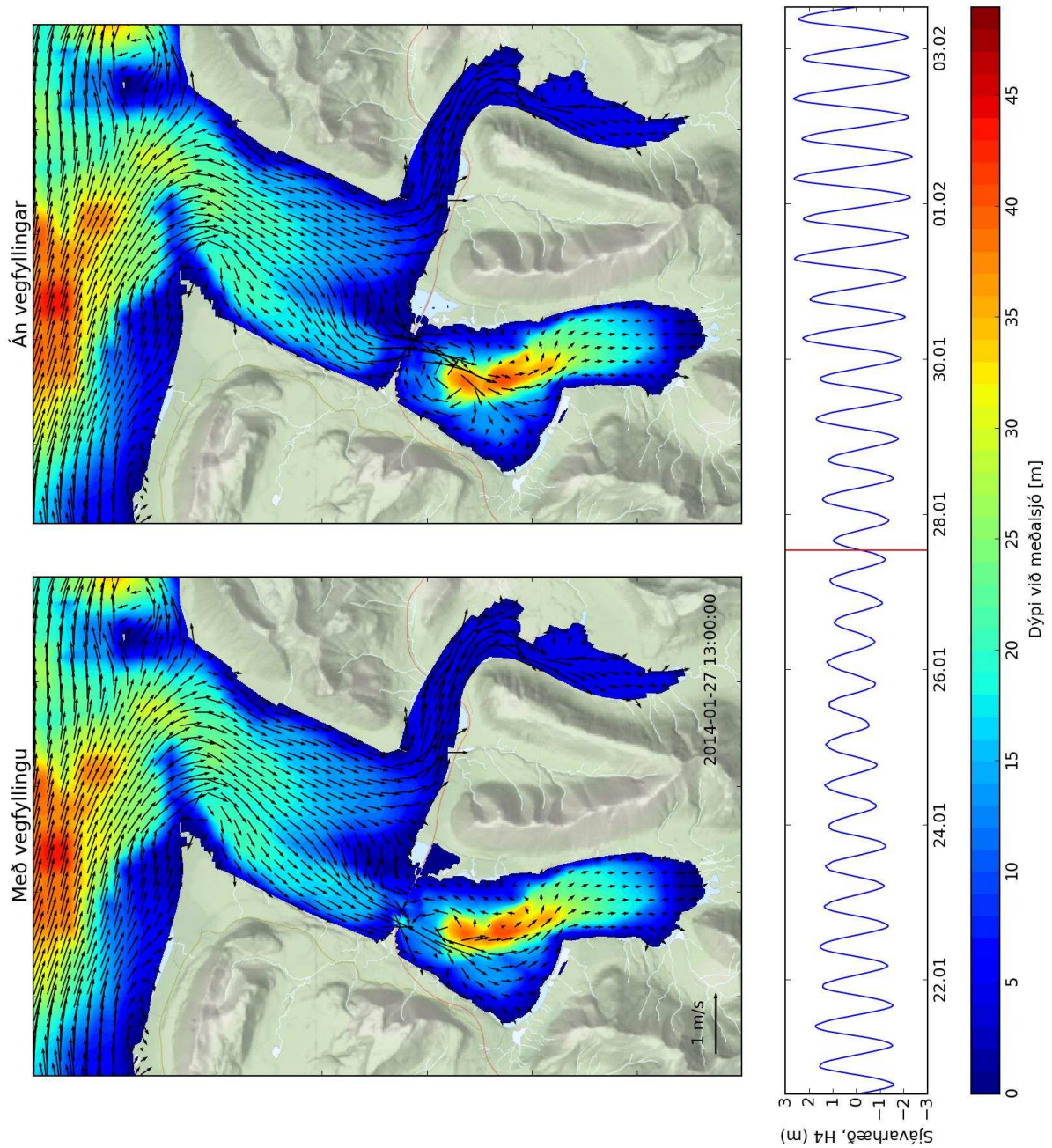
D. Straumreikningar



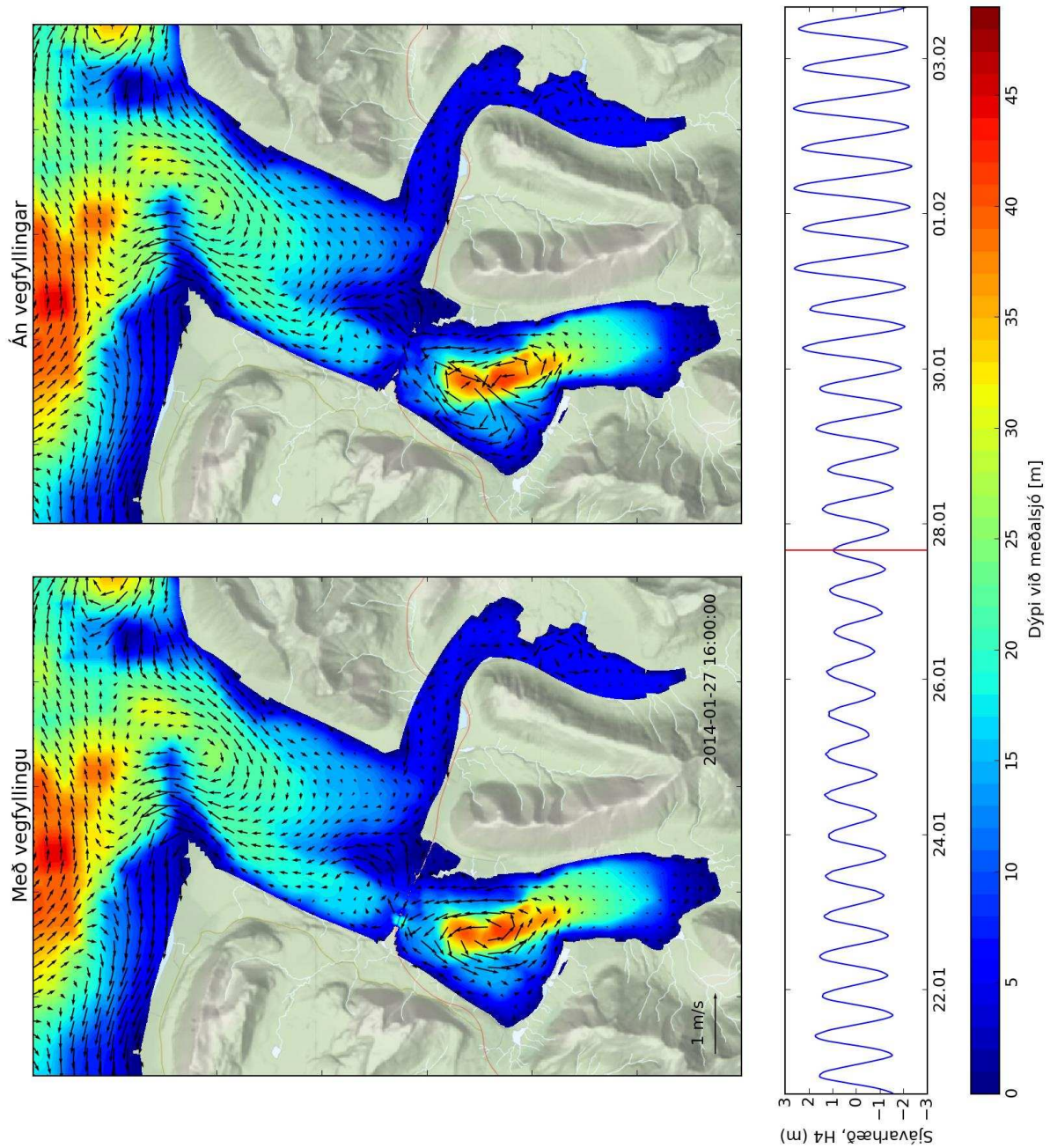
Mynd D. 1. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á útfalli á smástraumi, 27. janúar 2014 kl 7:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.



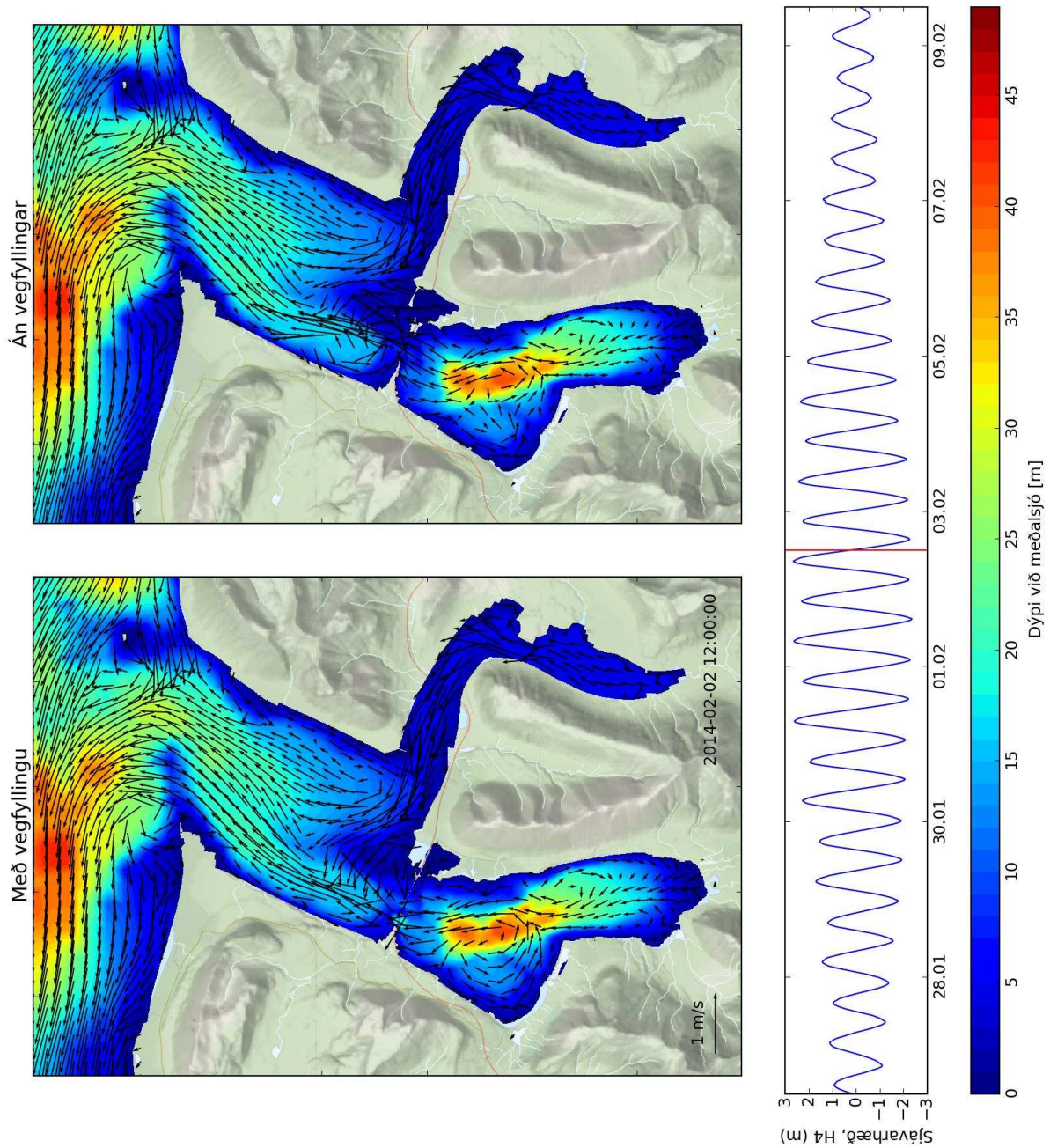
Mynd D. 2. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á liggjanda á fjöru á smástrami, 27. janúar 2014 kl 10:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.



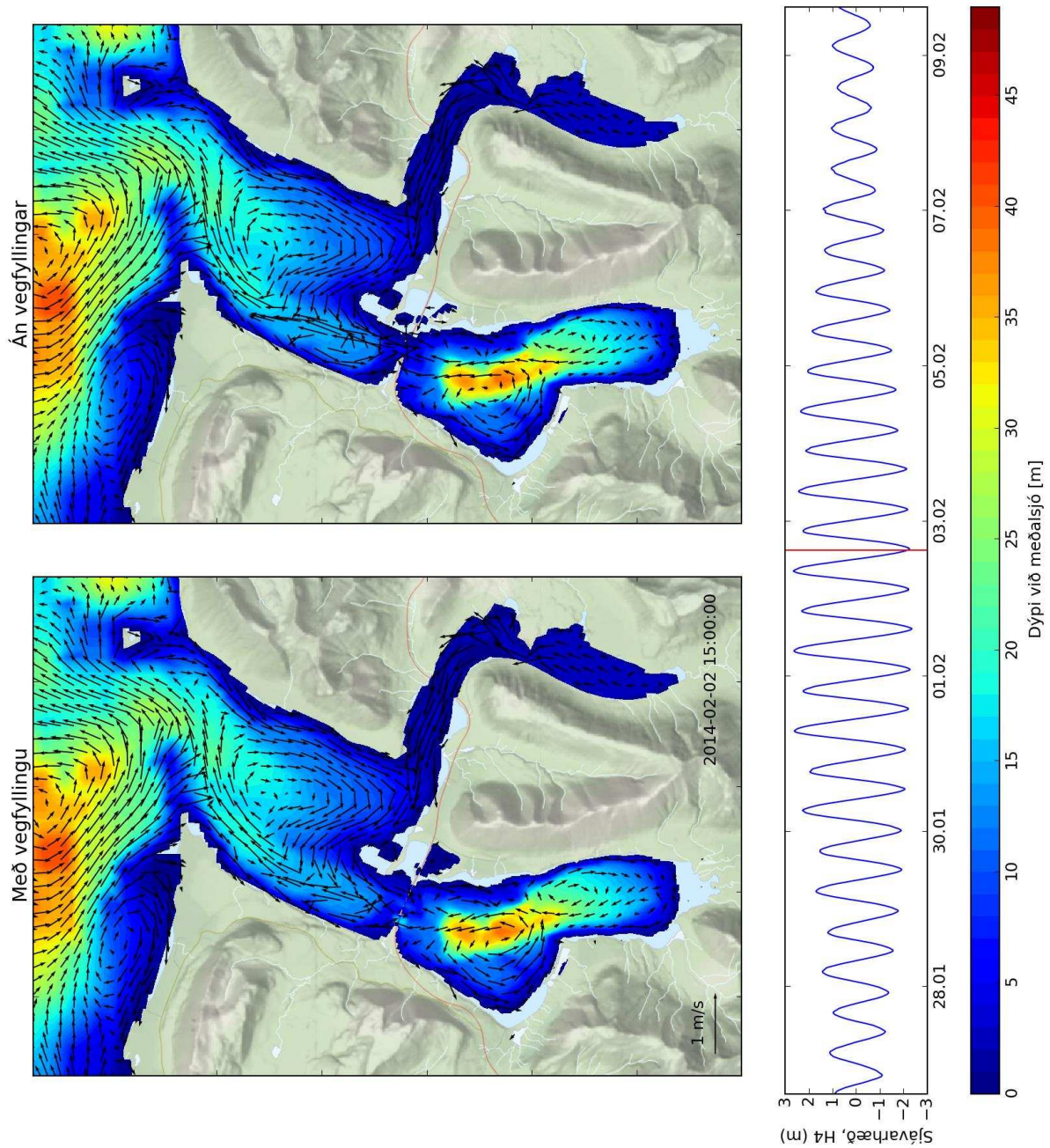
Mynd D. 3. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á aðfalli á smástraumi, 27. janúar 2014 kl 13:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.



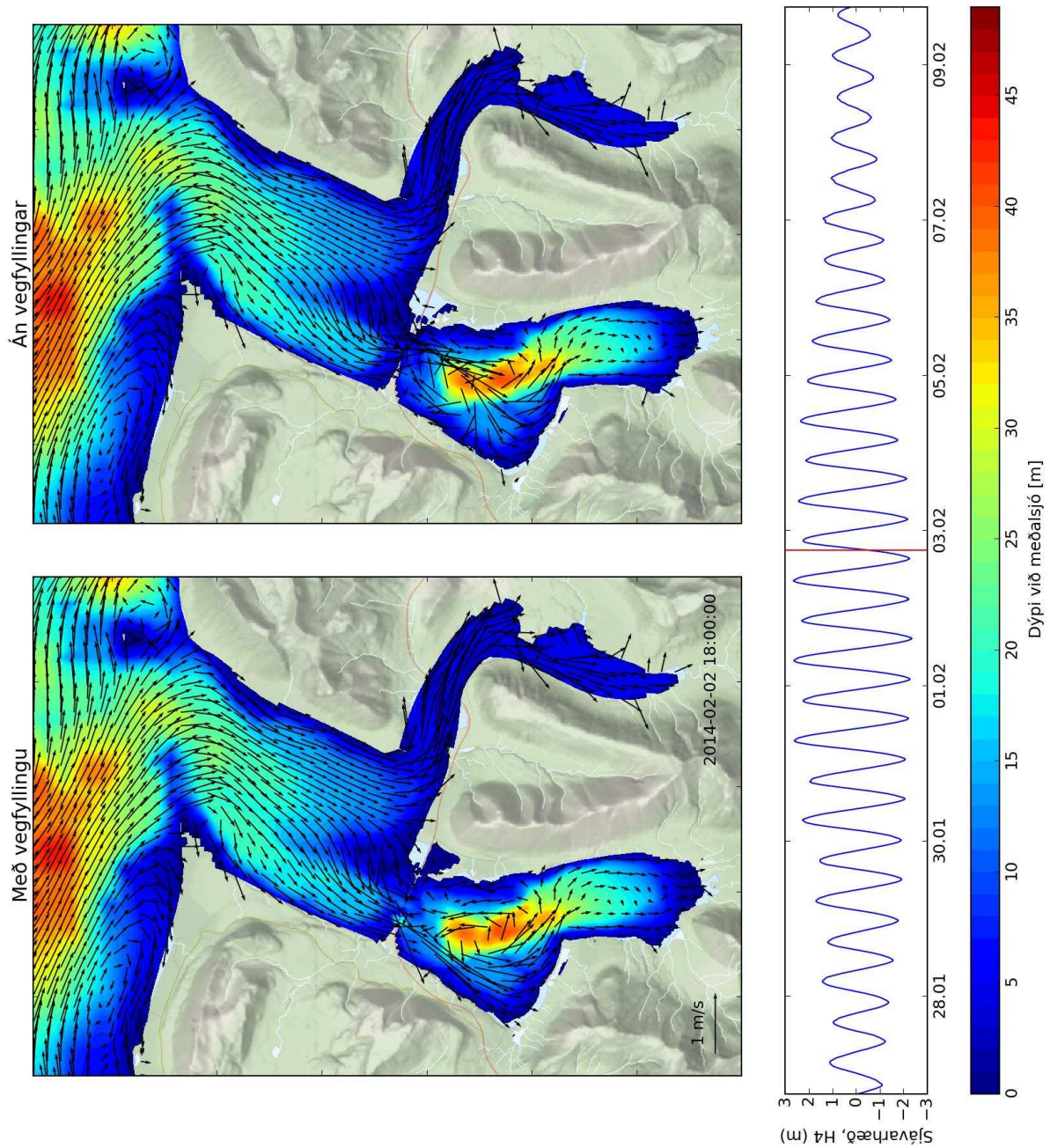
Mynd D. 4. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á liggjanda á flóði á smástraumi, 27. janúar 2014 kl 16:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.



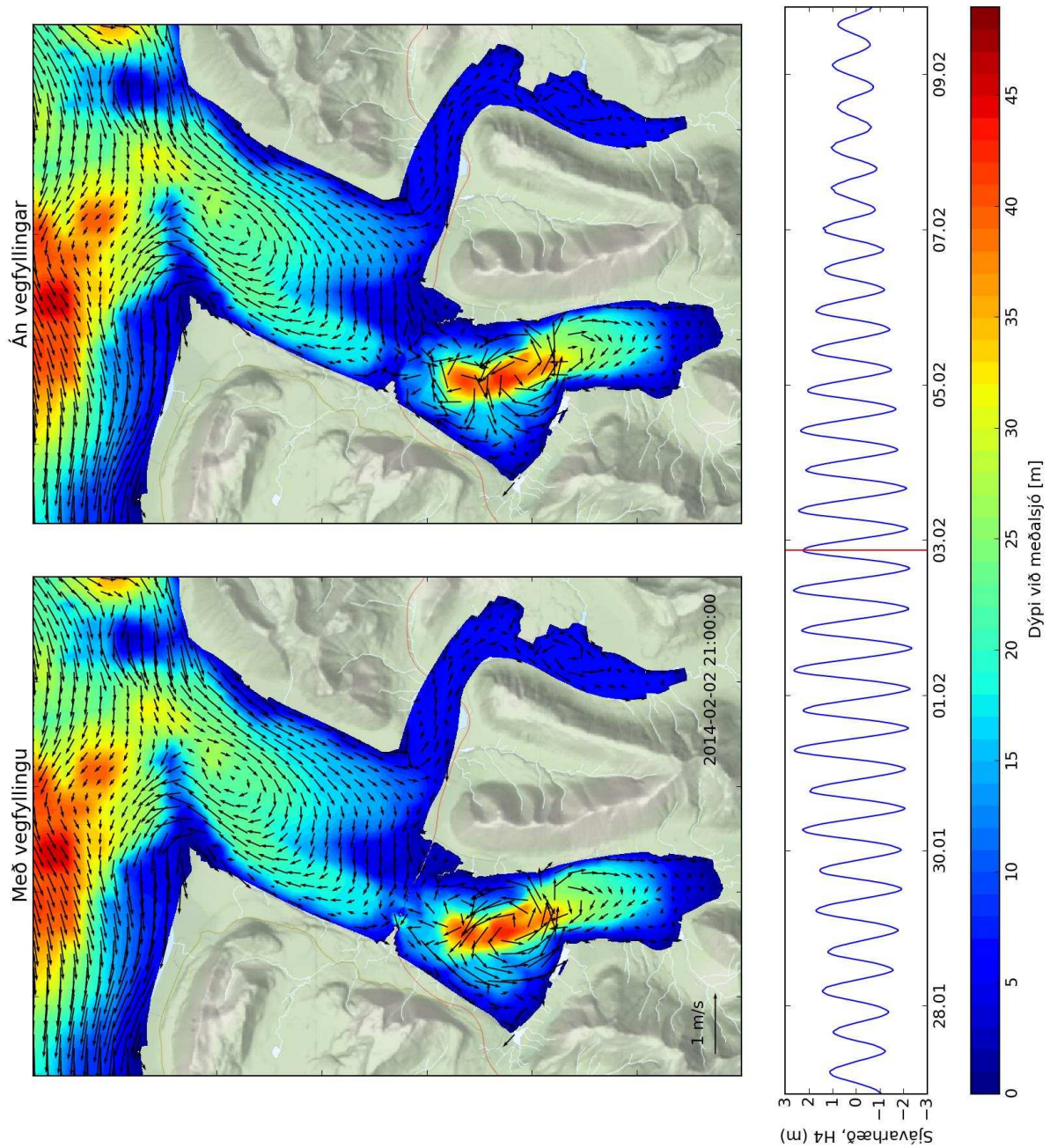
Mynd D. 5. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á útfalli á stórstraumi, 2. febrúar 2014 kl 12:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.



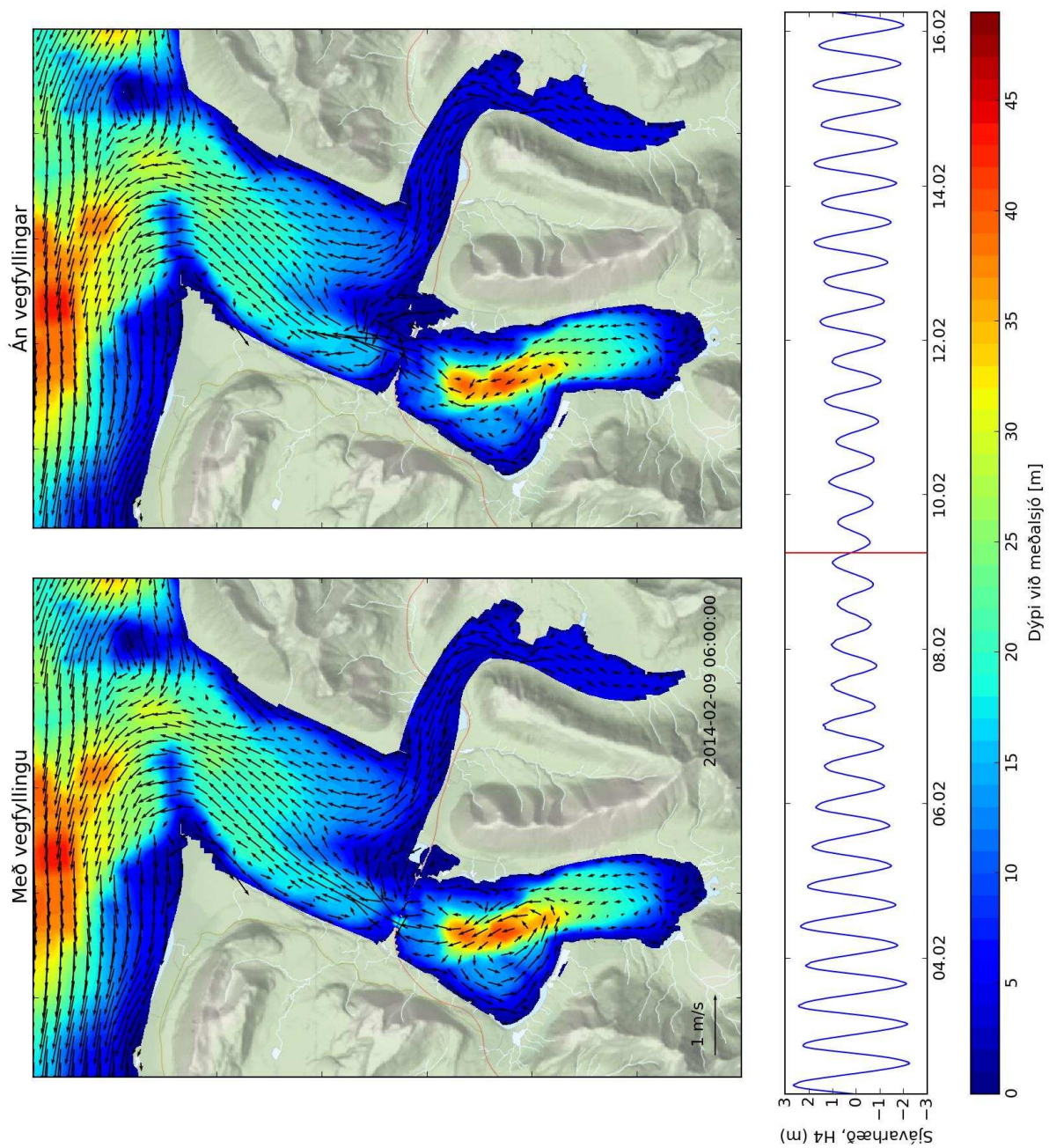
Mynd D. 6. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á liggjanda á fjöru á stórstraumi, 2. febrúar 2014 kl 15:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.



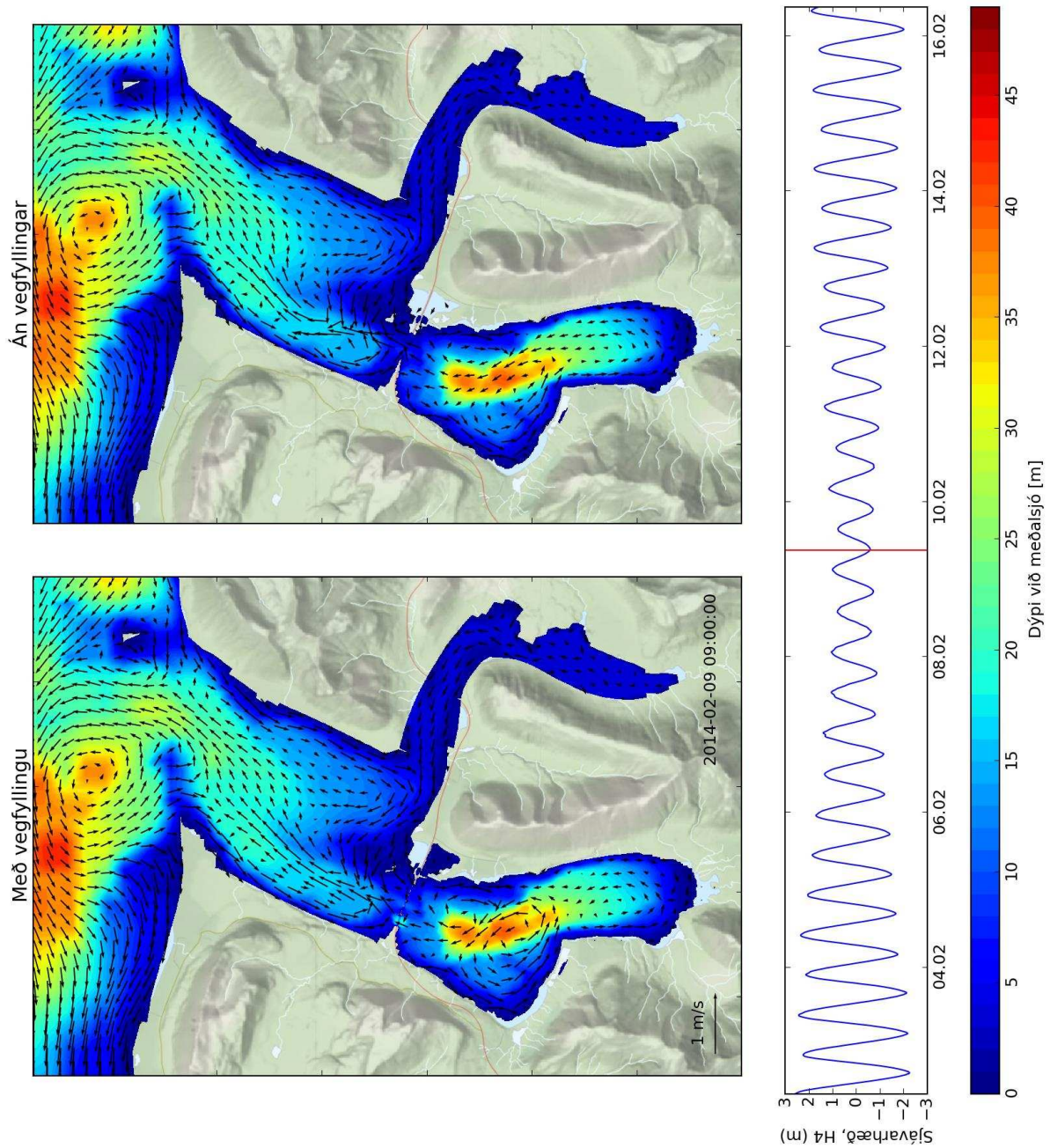
Mynd D. 7. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á aðfalli á stórstraumi, 2. febrúar 2014 kl 18:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.



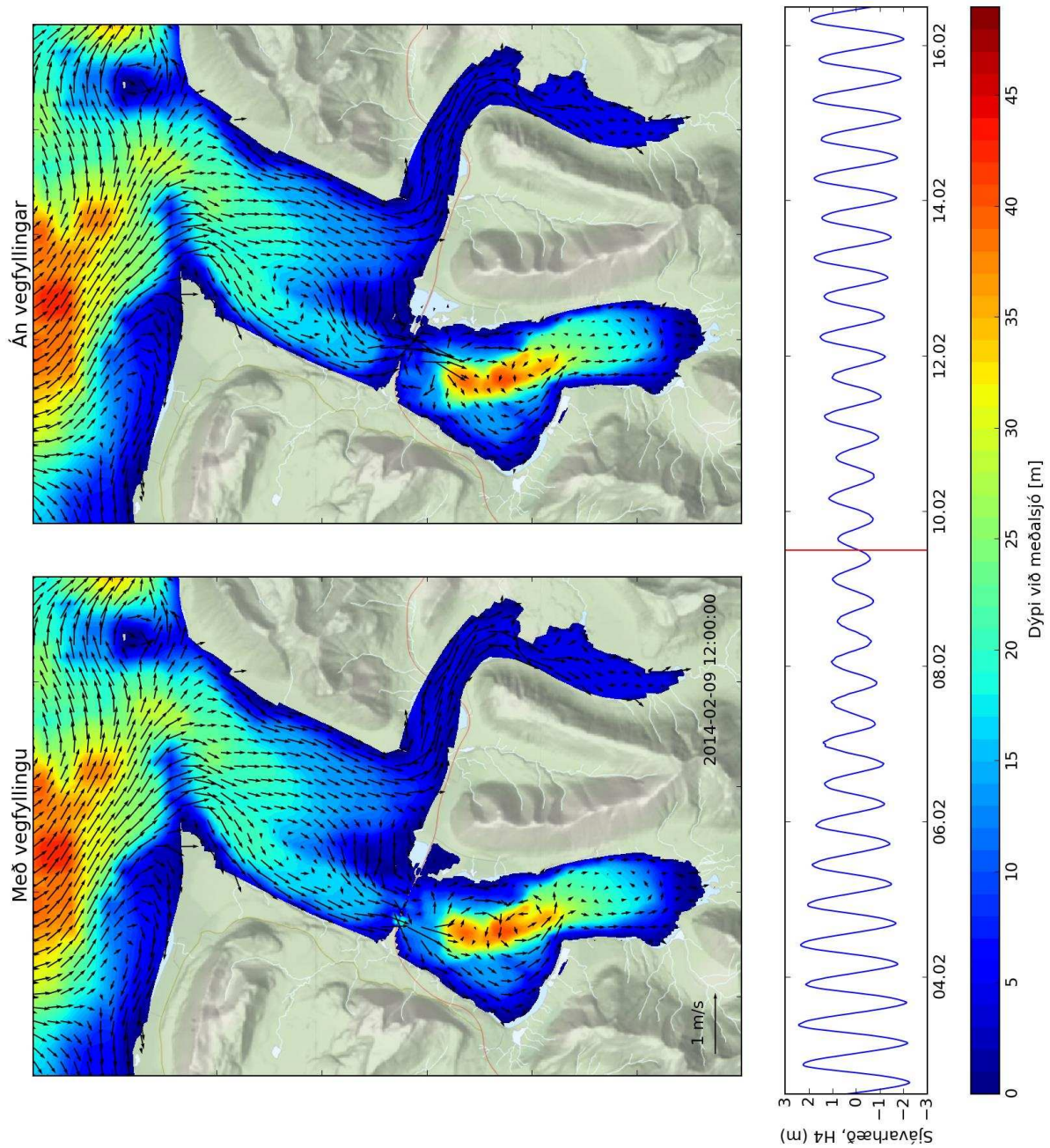
Mynd D. 8. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á liggjanda á flóði á stórstraumi, 2. febrúar 2014 kl 21:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.



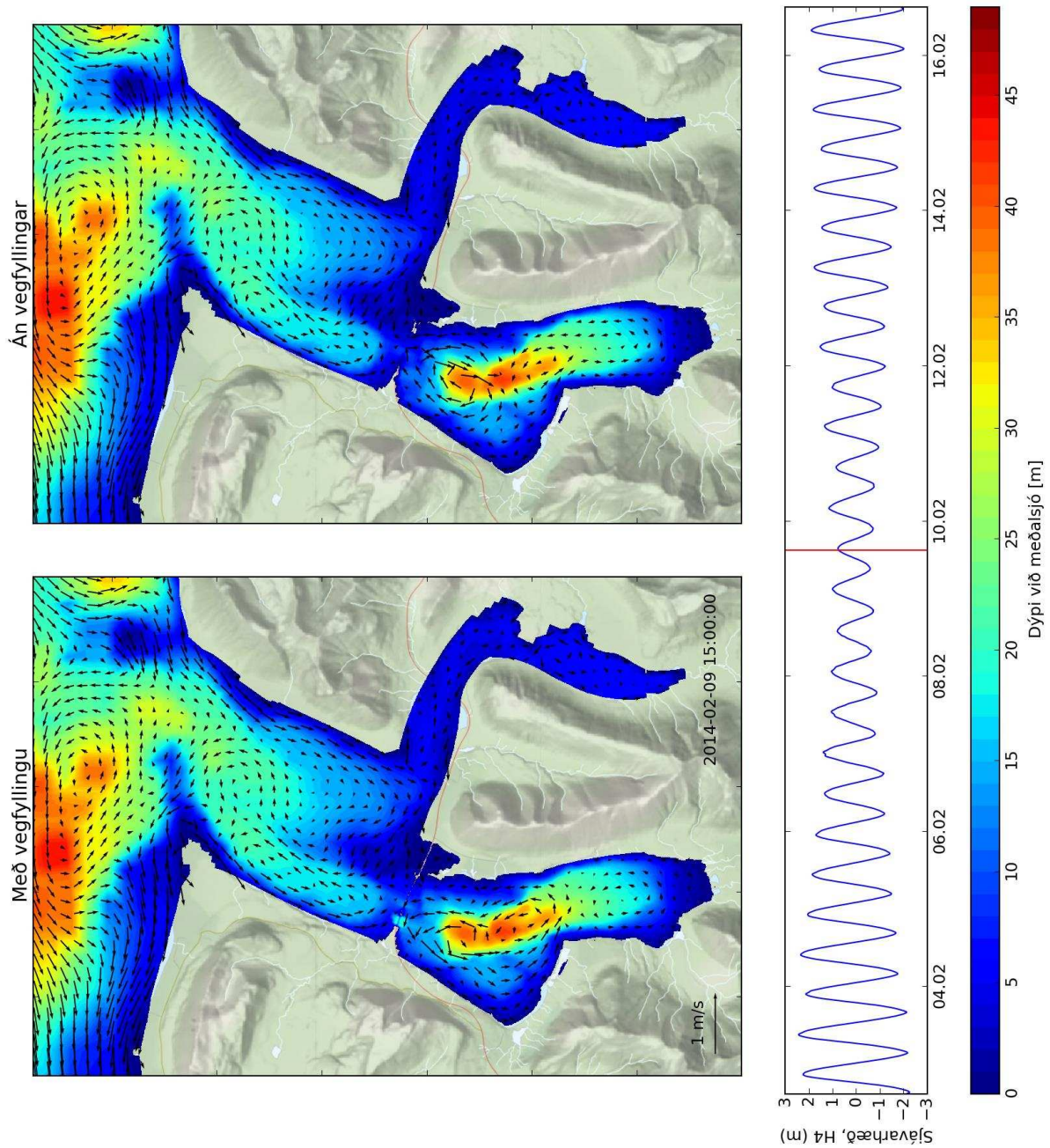
Mynd D. 9. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á útfalli á smástraumi, 9. febrúar 2014 kl 6:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.



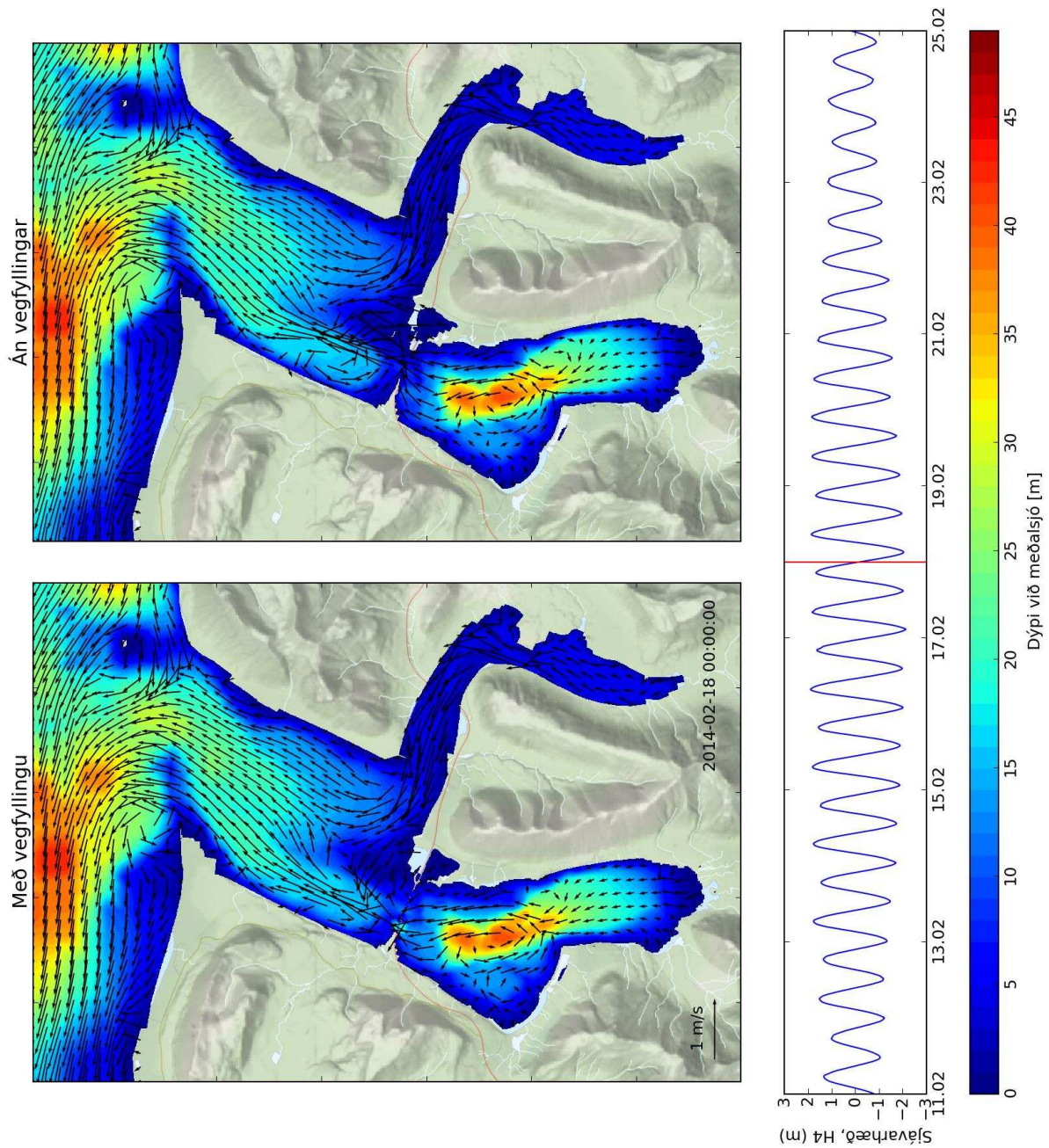
Mynd D. 10. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á liggjanda á fjöru á smástrami, 9. febrúar 2014 kl 9:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.



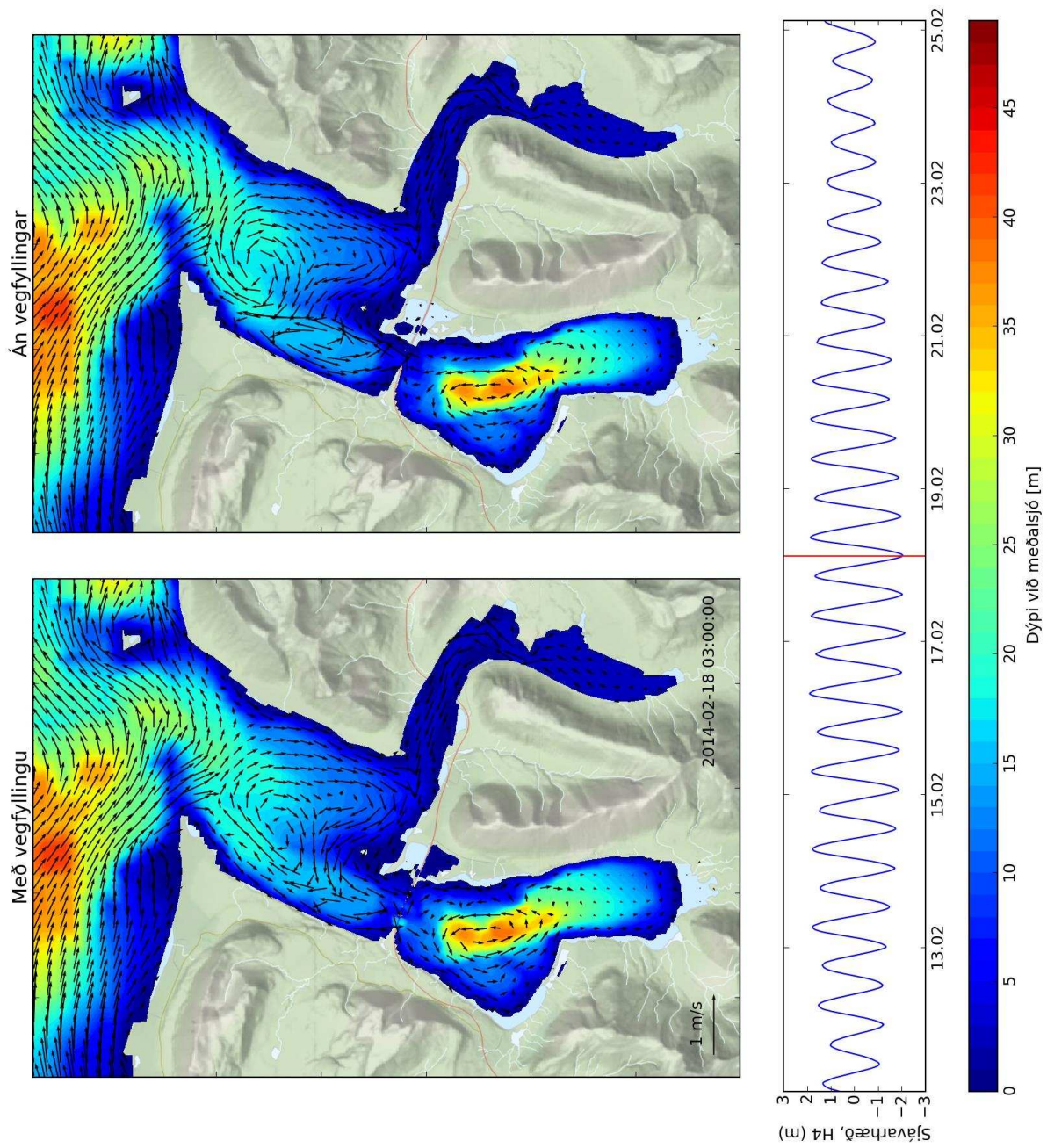
Mynd D. 11. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á aðfalli á smástraumi, 9. febrúar 2014 kl 12:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.



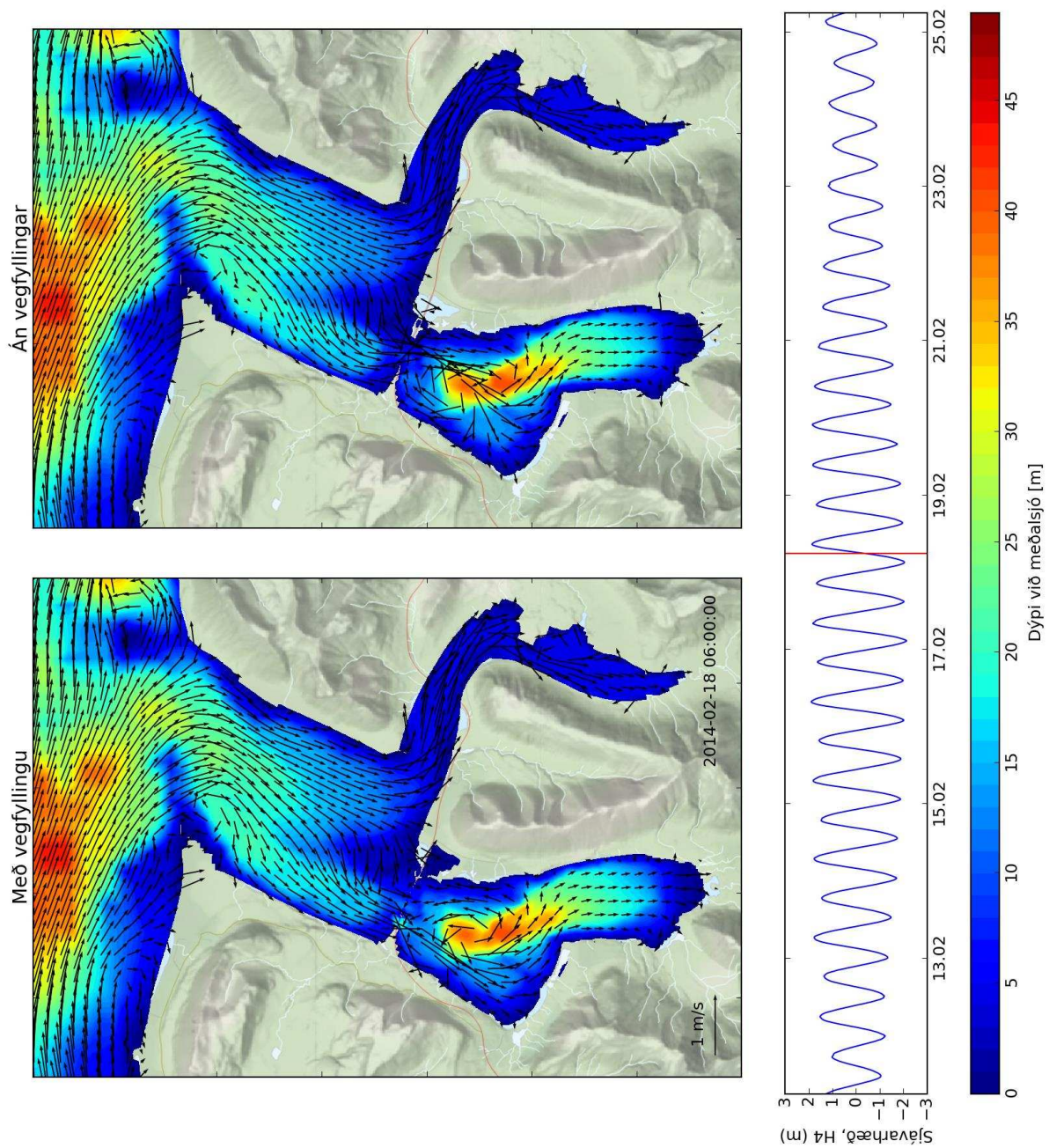
Mynd D. 12. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á liggjanda á flóði á smástraumi, 9. febrúar 2014 kl 15:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.



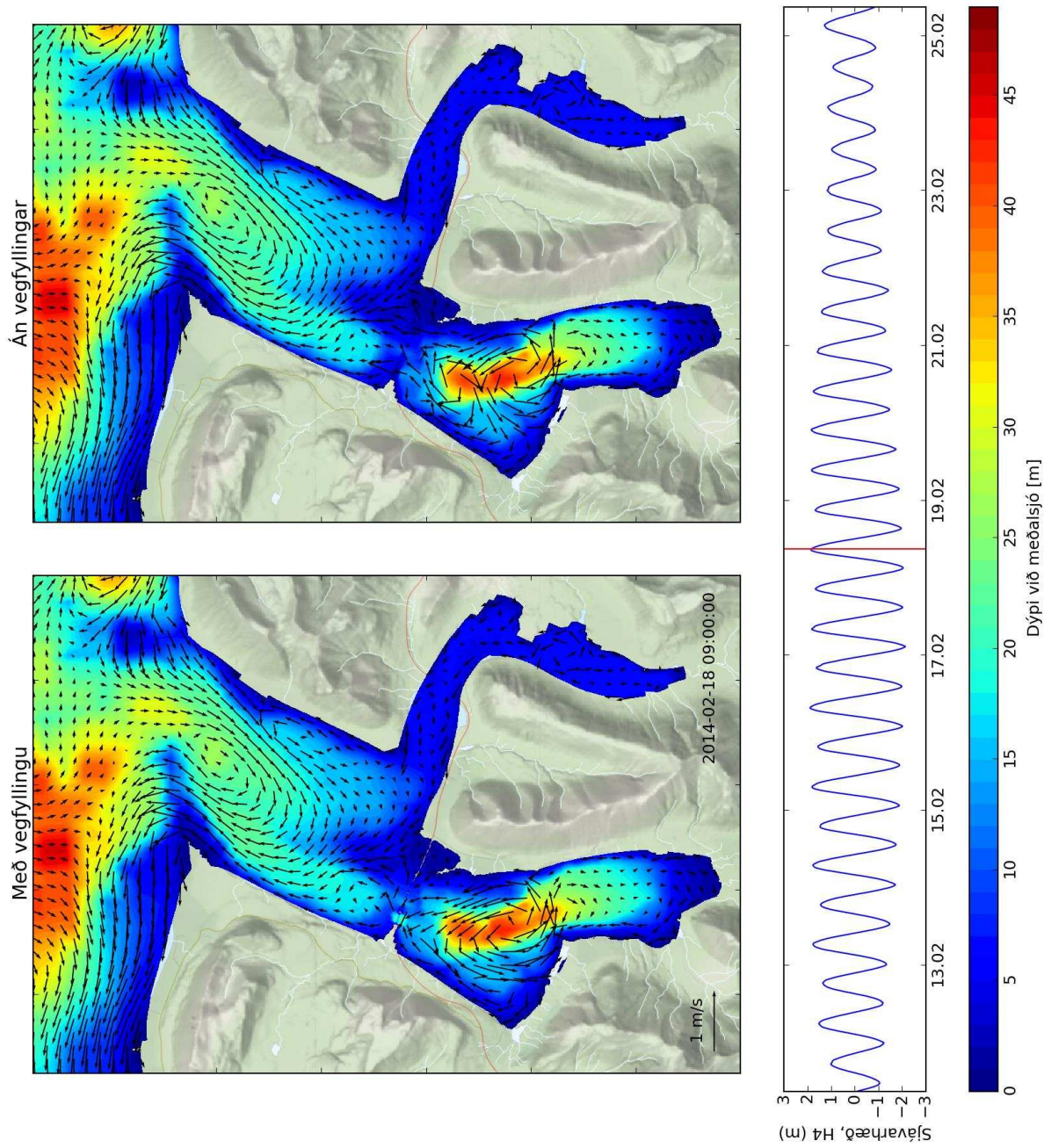
Mynd D. 13. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á útfalli á stórstraumi, 18. febrúar 2014 kl 00:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.



Mynd D. 14. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á liggjanda á fjöru á stærstraumi, 18. febrúar 2014 kl 3:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.



Mynd D. 15. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á aðfalli á stórstraumi, 18. febrúar 2014 kl 6:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.



Mynd D. 16. Reiknaðir straumar með (til vinstri) og án (til hægri) vegfyllingar á liggjanda á flóði á stórstraumi, 18. febrúar 2014 kl 9:00. Niðurstöður eru lagðar ofan á dýpi fjarðarins.