

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Matemaatika-loodusteaduskond
Meresüsteemide Instituut

**OPERATIIVSETE MEREMUDELITE VALIDEERIMINE
JA VÕRDLU LÄÄNEMERE IDAOSAS**
Magistritöö

Jekaterina Izotova

Juhendaja: Priidik Lagemaa, okeanograafia õppetool, Ph.D

Maa-teadused
2015

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus ning kinnitan, et esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Kinnitan, et antud töö koostamisel olen kõikide teiste autorite seisukohtadele, probleemipüstitustele, kogutud arvandmetele jmt viidanud.

(Töö autori nimi)

(allkiri ja kuupäev)

Juhendaja:

Töö vastab bakalaureusetööle/magistritööle esitatavatele nõuetele.

(allkiri ja kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees:

Lubatud kaitsmisele

.....

(nimi, allkiri, kuupäev)

SISUKORD

LÜHENDITE LOETELU	5
RESÜMEE	6
ABSTRACT	7
SISSEJUHATUS	8
1. TAUSTAINFO	10
1.1. Balti kõrgussüsteem BK77	10
1.2. Läänemere operatiivmudelite ajalugu	11
1.3. Teised uuringud	12
2. MATERJAL JA MEETODID	13
2.1. Andmed	13
2.1.1. Mõõteandmete kirjeldus	13
2.1.2. Mudelite kirjeldus	16
2.2. Meetod	20
2.2.1. Andmete töötlemine	20
2.2.2. Interpoleerimine	21
2.2.3. Statistikute arvutamine	21
2.2.4. Tulemuste visualiseerimise omapärad	22
3. TULEMUSED	23
3.1. Meretase	23
3.1.1. Meretase Pärnu meretaseme jaamas	23
3.1.2. Meretase Tallinna meretaseme jaamas	25
3.1.3. Meretase Peterburi meretaseme jaamas	25
3.1.4. Meretase kõikides jaamades	28
3.2. Pinnatemperatuur	30
3.2.1. Temperatuur Finn Maid trajektoiril	30

3.2.2.	Temperatuur Silja Europa trajektoiril.....	31
3.2.3.	Temperatuur Romantika2 trajektoiril	35
3.2.4.	Temperatuur kõikide FerryBox-ide trajektooridel	38
3.3.	Pinnasoolsus.....	38
3.3.1.	Soolsus Finn Maid trajektoiril	38
3.3.2.	Soolsus Silja Europa trajektoiril	41
3.3.3.	Soolsus Romantika2 trajektoiril	43
3.3.4.	Soolsused kõikide FerryBox-ide trajektooridel.....	45
4.	ARUTELU	46
	KOKKUVÕTE.....	48
	KASUTATUD KIRJANDUS	50
	SUMMARY	52

LÜHENDITE LOETELU

BOOS Baltic Operational Oceanographic System

BSH Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (Federal Maritime and Hydrographic Agency of Germany)

BSHC the Baltic Sea Hydrographic Commission

BSHcmod Circulation model developed at BSH

CMEMS Copernicus Marine Environmental Monitoring Service

DMI Danish Meteorological Institute

DMIcmod Circulation model developed at DMI

FMI Finnish Meteorological Institute

GRIB GRidded Binary

HBM HIROMB-BOOS Model

HIRLAM High-Resolution Limited Area Model

HIROMB High-Resolution Operational Model for the Baltic Sea

MARNET Marine Environmental Network of BSH

MSI Marine Systems Institute at Tallinn University of Technology

MyOceanFO MyOcean Follow-On

NEMO Nucleus for European Modelling of the Ocean

NetCDF Network Common Data Form

NOAMOD North Atlantic model

RMSD Root mean square deviation

SMHI Swedish Meteorological and Hydrological Institute

TAC Thematic Assembly Centre

RESÜMEE

Operatiivsete meremudelite valideerimine ja võrdlus Läänemere idaosas

Magistritöö

Jekaterina Izotova

Käesoleva magistritöö eesmärgiks on võrrelda operatiivseid mudeleid HBM ja HIROMB omavahel ja valideerida neid mõõtmistega. Töö käigus võrreldatakse kolme parameetri (meretase, pinnatemperatuur ja soolsus) käitumist ajaperiood 01.01.2012-31.12.2014 jooksul. Mõõtmistest kasutatakse meretaseme mõõtejaamadest saadud andmeid. Pinnatemperatuuri ja soolsuse valideerimiseks on kasutatud FerryBox mõõtmisi. Töös uuritakse ekstreemseid meretasemeid, pinnatemperatuuri ja soolsust erinevates Soome ja Liivi lahe punktides. Töö tulemused näitavad kõrget meretaseme korrelatsiooni mudelite ja mõõtmiste vahel, kuid HBM-MyO näitab parimat tulemust isegi siis, kui kõik teised mudelid ülehindavad veetaset. Kõik mudelid prognoosivad temperatuuri sarnaselt, kas alahindavad või ülehindavad mõõtmisi; leidub väga sarnaselt esitatud sesoonseid erinevusi. Taylorigrammist on näha, et HBM mudelid on kõige täpsemad temperatuuri prognoosimisel. Pinnasoolsuse modelleerimisel selgub, et magevee sissevoolu arvestamine mudelites on väga tähtis. HIROMB-BS01 on pinnasoolsuse prognoosimisel võrreldud mudelitest kõige ebatäpsem ja mudel HIROMB-EST kõige täpsem.

Võtmesõnad

Valideerimine, Soome laht, Liivi laht, Eesti, HIROMB, HBM

ABSTRACT

Validation of Operational Ocean Models in The Eastern Baltic Sea

Master's Thesis

Jekaterina Izotova

The aim of this master's thesis is to validate HBM and HIROMB operational forecast models, so the behaviour of three parameters (sea level, sea surface temperature and salinity) is examined during recent 3-year period to compare and validate these models. The data received from the sea level mooring stations and the FerryBox'es are used to study parameters under investigation. Extreme sea levels at the coastal stations, temperature and salinity at the several different point sets in the Eastern Baltic Sea are investigated. The models show high correlation between measurements and modelled sea level, but HBM-MyO model gives the best result even in the cases, where other models are overestimating sea level. All model forecasts for temperature are very similar either underestimating or overestimating the measurements. Moreover, seasonal differences are presented with small differences. Taylor diagrams show that HBM models are generally precise when predicting sea surface temperature. It is clear that freshwater inflow is crucial in models. As a result HIROMB-BS01 model is the worst in salinity forecasting in the Gulf of Finland and, conversely, HIROMB-EST model showed the best results here.

Keywords

Validation, Gulf of Finland, Gulf of Riga, Estonia, HIROMB, HBM

SISSEJUHATUS

Maailma teadlased ja insenerid teostavad pidevalt okeanograafilisi uuringuid ja arendavad uusi modelleerimise tehnoloogiaid. Operatiivne okeanograafia on ülitähtis lühiajalisteks prognoosideks ääremeres ja rannikulähedastes alades.

1950-ndatel aastatel alustati numbriliste mudelite arendamist, mille aluseks on kahedimensionaalsed madala vee võrrandid (Hansen 1956, Uusitalo 1960). Esimesed numbrilise modelleerimise praktilised rakendused igapäevases prognoositeeninduses ilmusid siiski alles 1980-ndatel (Peeck *et al.* 1982).

Soome lahe mudelite valideerimisega on tegelenud mitmed uuringud. Ühes suuremahulisemas uuringus võrreldi kuut 3D mudelit enam kui 300 temperatuuri ja soolsuse vertikaalse profiiliga Soome lahes (Myrberg *et al.* 2010). Mudelite valideerimise tulemusena leiti, et HIROMB mudel on parim teiste mudelite seas, kuigi mitte ükski mudel ei olnud parim või kehvem kõikidel juhtudel. Teisel uuringul (Elken *et al.* 2008) on näidatud, et soojematel perioodidel HIROMB mudel prognoosib liiga kõrgeid merepinna soolsuse gradiente võrreldes mõõdetud andmetega. Meretaseme andmete valideerimise (Elken *et al.* 2008; Gästgifvars *et al.* 2008) tulemusena on leitud, et ruutkeskmised erinevused Soome lahes on 5-10 cm.

Eesti rannikualal on arvukalt lahtesid, saari ja poolsaari, seega on kõrge horisontaalne resolutsioon väga tähtis meretaseme, temperatuuri ja soolsuse täpseks hindamiseks. Numbrilise modelleerimise prognoose hakati Eestis kasutama aastal 2005 (Elken *et al.* 2006), kuid uute mudelite järkjärguline arendamine jätkub ka tänapäeval.

Töö eesmärgiks on võrrelda omavahel mõõtmisi ja erinevaid mudeleid Läänemere idaosas, sealhulgas Soome lahes, Väinameres ja Liivi lahes.

Omavahel võrreldakse kahe mudeli HBM ja HIROMB erinevaid seaded, nimelt EST, BS01 ja MyO. Mõõtmised, millega võrreldakse mudeleid, on valitud kahte tüüpi: meretaseme mõõtejaamad ja FerryBox. Mõõtejaamad on Läti, Eesti, Soome ja Venemaa meretaseme rannikujaamad. Enamus FerryBox trajektooridest paiknevad Soome lahes.

Võrreldavateks parameetriteks on valitud meretase, merepinna temperatuur ja soolsus, kuna nad on mudelite käitumise head indikaatorid ja on laialdaselt kasutatavad parameetrid.

Uuritav ajaperiood on 01.01.2012 – 31.12.2014.

1. TAUSTAINFO

1.1. Balti kõrgussüsteem BK77

Läänemere meretase on mõjutatud peamiselt jõgede sissevoolu ja tuultega. Sesoonne varieeruvus ei mõjuta keskmiseid pikaajalisi meretaseme aegridasid, seega neid võib kasutada keskmise meretaseme arvutamiseks. Seda teoreetilist veepinda kasutatakse lähtealuseks mere sügavuste hindamisel.

Ajalooliselt kasutatakse Läänemere riikides erinevaid kõrgussüsteeme, mis sõltuvad riigi enda merevee taseme andmetest. Alates aastast 1940 kasutati Läänemere idarannikul (Venemaa, Eesti, Läti, Leedu, Poola ja Saksamaa idapool) Balti kõrgussüsteemi, mida väikeste parandustega kasutatakse ka tänapäeval nullkõrgusena. Süsteemi uuendati aastal 1977 ja hakati nimetama Balti 1977. a kõrgussüsteemiks (lühidalt BK77). Kõrgussüsteemi null ühtib ajavahemikus 1825–1940 tehtud Kroonlinna merevee taseme mõõtmise keskmise tulemusega. Läänemere lõunaosas (Saksamaa läänepool, Taani) kasutatakse *United European Levelling Network* (lühidalt UELN), mille aluseks on Amsterdami Normaalsnull (*Normal Amsterdam Zero*). Kahe ülalmainitud kõrgussüsteemide erinevus on umbes 15 cm (Kroonlinna null on kõrgem). Läänemere põhjaosa (Soome ja Rootsi) on kaetud Skandinaavia kõrgussüsteemiga (*Nordic Height System* NH-60). Absoluutsete kõrguste erinevus BK77 ja NH-60 vahel on umbes 15 cm. Läänemere alas kasutatakse vähemalt kolme erinevat kõrgussüsteemi (BSHC Working Group 2007).

Balti 1977. a kõrgussüsteem on määratletud järgmiste parameetritega: kõrgussüsteemi epohh on määramata; kasutatakse keskmist Maa püsivate loodete

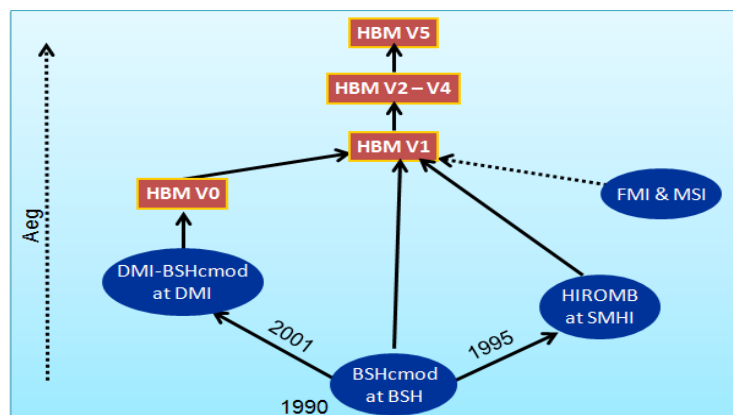
süsteemi; kõrgused arvutatakse normaalkõrgustena, Maa raskuskiirenduse normaalvälja arvutamisel kasutatakse Helmerti (1901) valemit.

1.2. Läänemere operatiivmudelite ajalugu

Läänemere operatiivse prognoosiga tänapäevases mõistes hakati tegelema 1990-ndatel Saksamaal BSH-s, kus loodi selle tarbeks tsirkulatsioonimudel BSHcmod (Kleine 1994; Dick *et al.* 2001; Dick *et al.* 2008). Alates 1995-nda aastast sai BSH poolt välja töötatud mudeli BSHcmod koodi endale arendamiseks SMHI, millest arenes välja HIROMB mudel. Sarnaselt sai vahepeal edasi arenenud BSHcmod koodi endale arendamiseks DMI 2001 aastal ja arendas sellest välja enda versiooni DMImod (vt Joonis 1). Aastaks 2006 oli tekkinud Läänemere operatiivseks prognoosimiseks kolm (erinevat) tsirkulatsioonimudelit: BSHcmod, HIROMB ja DMImod, mis kõik on BSHcmod algse versiooni järeltulijad (Funkquist ja Kleine 2007; Berg ja Weismann Poulsen 2012).

Aastal 2009 alguse saanud MyOcean projekti üks eesmärkidest oli Läänemerele koondada erinevate mudelite tugevused ja välja arendada uus mudel, mis oleks parem kõigist endistest mudelitest ja mille arendamisega hakkaksid MyOcean projekti partnerid BSH, DMI, FMI, MSI ja SMHI tegelema koos. Selle mudeli nimeks pandi HBM. Kuivõrd tehnilisest lähtekoodi kvaliteedi seisukohast pakkus DMImod sel ajal kõige paremat algust grupitöö alustamiseks valiti HBM esimeseks versiooniks DMImod. Sinna hakati juurde lisama HIROMB ja BSHcmod tugevusi ja funktsionaalsust. MyOcean projekti esimese kolmeaastase etapi lõpuks selgus siiski, et HIROMB mudeli funktsionaalsuste lisamine HBM mudelile on liiga keeruline. MyOcean projekti teises etapis MyOcean2 otsustas SMHI väljuda HBM mudeli arendajate hulgast ja hakkas tegelema NEMO mudeli operatiivse versiooni arendamisega Läänemere jaoks. Teised projekti partnerid (BSH, FMI, DMI ja MSI) sõlmisid HBM mudeli arendamise siduva koostöölepe ja jätkasid tööd HBM arendamisega. Seega on HBM mudel algse BSHcmod mudeli kolmanda põlvkonna järeltulija sisaldades peamiselt kompositsiooni BSHcmod ja DMImod mudelitest ja

vähesel määral HIROMB mudelist. Peale HBM-i loomist on mudelit edasi arendatud kogu MyOcean projekti ajal (MyOcean 2009-2012, MyOcean2 2012-2014 ja MyOceanFO 2014-2015) ja arendustöö jätkub CMEMS teenuse raames (Berg ja Weismann Poulsen 2012).



Joonis 1. Mudelite areng - HBM (HIROMB-BOOS-Model).

1.3. Teised uuringud

Teisel uuringul hinnati Taani hüdrodünaamilise prognoosimissüsteemi (mis katab Põhjamerd, Taani väinu ja Läänemerd) operatiivse mudeli prognoosimisvõimet. Mõõtmiseid kasutati 30 meretaseme jaamadest. Jaamade 1993-nda aasta andmete analüüs näitas, et 36 tunnilise prognoosi perioodil ruutkeskmine hälve on vahemikus 0.12-0.23 meetrit, maksimaalne keskmine hälve on vahemikus 0.43-0.86 meetrit. Mudeli tulemused võivad olla parandatud, kui rakendada mudelile meretaseme *in situ* andmeid. Andmete assimileerimine ja Kalmani filtri kasutamine aitab mudelile seadistada korrektset initsialiseerumist (Vested *et al.* 1995).

Suursaar *et al.* (2002) oma töös uuris, millest sõltub Väinamere ja Pärnu lahe meretase ja kasutas selleks kõrglahutusega 2D hüdrodünaamilise mudeli. Töö tulemusena oli see, minimaalne veetase on peamiselt tingitud idatuultega ja on määratletud regionaalse Läänemere tuuleväljaga, tormilised kõrgtased on aga lokaalsed ja lühiajalised. Töö käigus selgus, et see mudel sobib ekstremaalse meretaseme operatiivse prognoosimise arendamiseks.

2. MATERJAL JA MEETODID

Käesolevas peatükis on käsitletud uurimisandmeid ja uuringuks kasutatud meetodit.

2.1. Andmed

Antud magistritöös on mudelite valideerimiseks kasutatud kahte tüüpi mõõtmisi ja võrreldud omavahel neli erinevat mudelit. Mõõtmistest on kasutatud meretaseme mõõtejaamadest saadud andmeid. Pinnatemperatuuri ja soolsuse valideerimiseks on kasutatud FerryBox mõõtmisi. Töös valideeritakse järgmisi mudeleid: HBM-EST, HBM-MyO, HIROMB-BS01 ja HIROMB-EST.

2.1.1. Mõõteandmete kirjeldus

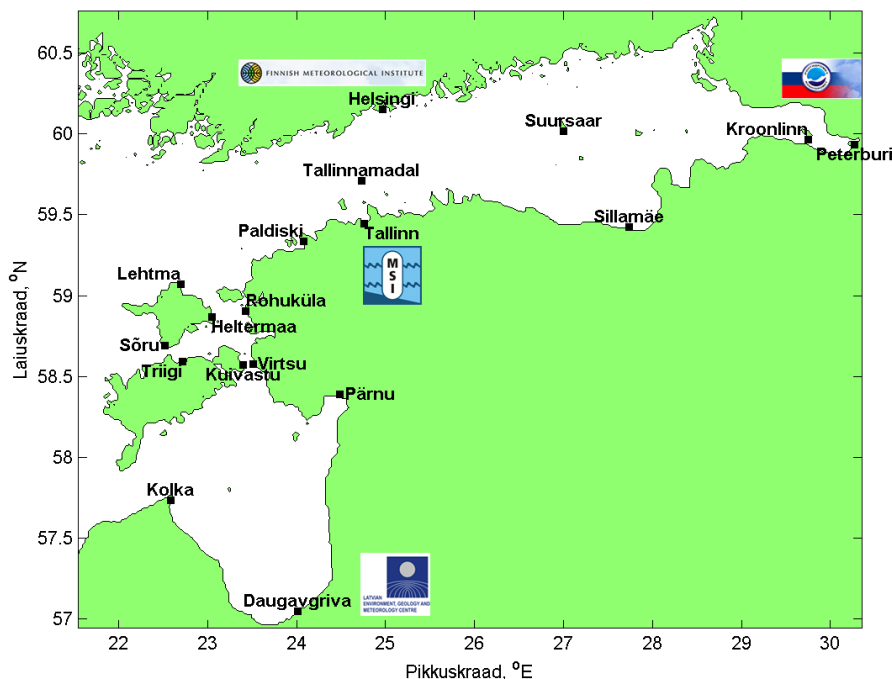
Selles alapeatükis on esitatud mõõtejaamade ja laevade andmete kirjeldused. Andmed on mõõdetud BOOS partnerite poolt, millele on lisatud kvaliteedimärgised ja mis on ühtsesse andmebaasi kogutud ja NetCDF formaati konverteeritud CMEMS *in situ* TAC poolt¹. Läänemere *in situ* andmetega tegeleb Copernicuse mereteenuse raames SMHI, kes on ka aktiivne BOOS-i liige. Kasutatud andmefailide maht on kokku 439 MB.

2.1.1.1. Meretaseme mõõtejaamad

Töö käigus analüüsiti 18 mõõtejaama andmeid, nende hulgas 12 Eesti (Heltermaa, Kuivastu, Lehtma, Paldiski, Pärnu, Rohuküla, Sillamäe, Sõru, Tallinn, Tallinnamadal, Triigi, Virtsu), 3 Venemaa (Kroonlinn, Peterburi, Suursaar), üks Soome (Helsingi) ja kaks Läti jaama (Daugavgriva, Kolka) (vt Joonis 2). Tulemuste

¹ <http://marine.copernicus.eu/>

kompaktseks esitamiseks on valitud Pärnu, Tallinna ja Peterburi meretaseme jaamad kuna nende andmete analüüs kajastab kõikide ülejäänud jaamadest leitud tulemusi.



Joonis 2. Veetaseme jaamade asukohad.

Enamikes jaamades on mõõtmised olemas kogu kolme aastase uurimisperioodi jaoks, alates 01.01.2012 kuni 31.12.2014. Sõru jaam on erandjuhtumiks, sest sellest jaamast on olemas ainult 12 kuud andmeid, nimelt 01.01.-30.11.2012 ning aasta 2013 jaanuar. Mõõtmiste ajasamm on üldjuhul 1 tund, Suursaare andmed on 3 tunnilise sammuga.

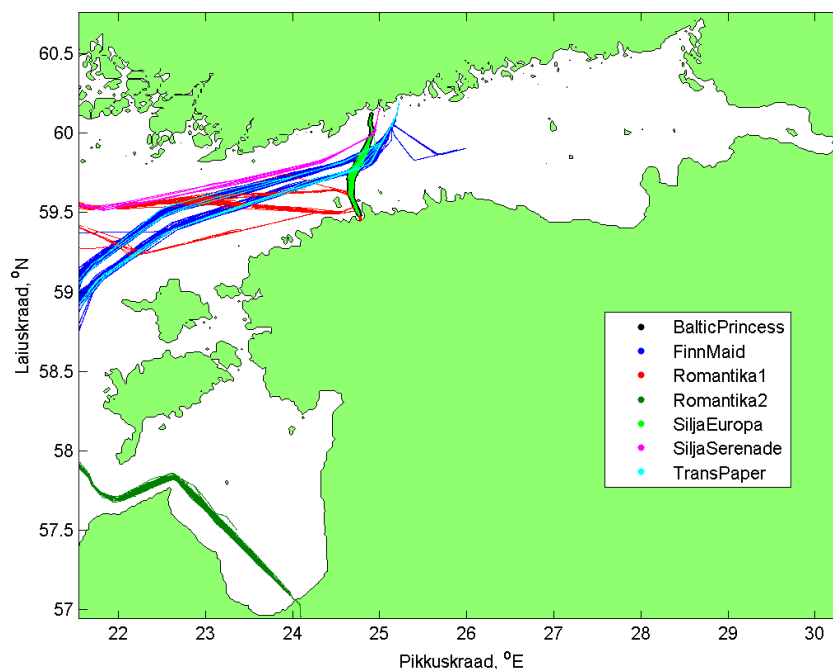
2.1.1.2. FerryBox laevad

FerryBox on operatiivse okeanograafia automatiseeritud monitooringu instrument, mida paigaldakse liikuva platformi peale, ehk laevadele. Süsteem platform-FerryBox on madala maksumusega ja usaldusväärne võimalus teostada veepinna parameetrite regulaarseid mõõtmisi. FerryBox-i sensorid ja automaatsed analüüsimisaparaadid mõõdavad füüsilisi, bioloogilisi ja keemilisi parameetreid (temperatuur, soolsus, pH, hapniku sisaldus, klorofüll jne). Süsteemi eelised on järgmised: süsteem on kaitsud keskkonna mõjudest (nt lained ja hoovused); lihtsam hoida bioreostuse ära; energia

piirangud puuduvad (võrreldes automaatpoidadega); profiilid annavad rohkem infot, kui punktmõõtmised (poid) (Petersen *et al.* 2003).

Käesoleva töö raames analüüsiti kuut andmete kogumit. Need on FerryBox-ide mõõtmised laevadelt Baltic Princess, Finn Maid, Romantika, Silja Europa, Silja Serenade, Trans Paper.

Joonis 3 on kujutatud erinevate laevade trajektoorid uuritava perioodil. Jooniselt on näha, et mõõtmised katavad peamiselt Soome lahe läänepoolt. Kuna Romantika FerryBox-i mõõtmised olid tehtud nii Soome, kui ka Liivi lahes, mis on hüdrodünaamiliselt küllaltki erinevad basseinid, siis eraldati edaspidises andmete töötlusel analüüsi selguse huvides Soome ja Liivi lahe andmed ning tähistati need vastavalt Romantika1 ja Romantika2. Sarnaselt meretaseme mõõtmistega ei ole kõikide FerryBoxide andmeid töös esitatud ja valitud on mõned laevad, mis annavad üldise ülevaate saadud tulemustest. Lähtuvalt laevade liikumise trajektooridest on analüüsi esitamiseks valitud Finn Maid (trajektoor piki Soome lahe lääneosa), Silja Europa (trajektoor risti Soome lahega) ja Romantika2 (trajektoor Liivi lahes) FerryBox-ide mõõtmised.



Joonis 3. FerryBox trajektoorid aastatel 2012-2014.

Laevade Baltic Princess ja Silja Europa mõõteandmete pikkus on ligikaudu 1 aasta, laeva Finn Maid andmeid on kolme aasta jagu ja ülejäänutel laevade andmete pikkus on umbes lühem, kui aasta (vt Tabel 1). Mõõtmiste ajasamm on üldjuhul üks minut. Laevade Finn Maid, Silja Serenade ja Trans Paper korral ajasamm on ligikaudu 20 sekundit.

Tabel 1. Erinevate laevade andmeridade pikkused

Laeva nimetus	Andmete alkuupäev	Andmete lõppkuupäev	Andmete pikkus päevades
Baltic Princess	24.02.2012	21.01.2013	332
Finn Maid	19.01.2012	20.12.2014	1066
Romantika1	12.08.2014	30.12.2014	140
Romantika2	27.11.2013	21.07.2014	236
Silja Europa	15.07.2013	22.07.2014	372
Silja Serenade	17.07.2014	28.08.2014	42
Trans Paper	18.01.2012	28.01.2012	10

2.1.2. Mudelite kirjeldus

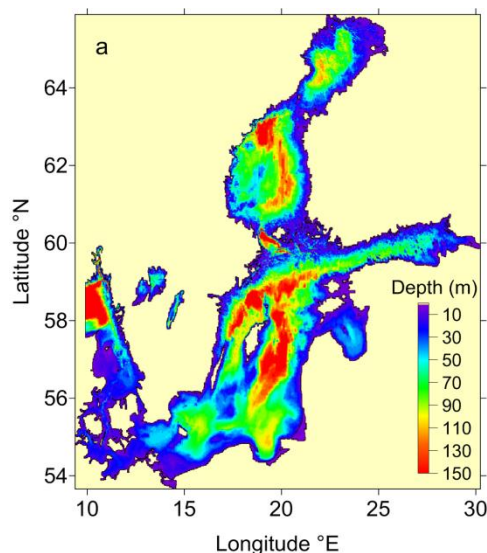
Ühene mudeli määratlus koosneb reeglina kahest osast: mudeli kood ja mudeli seade. Seetõttu on mugav kasutada kaheosalist mudeli nime, kus esimene osa näitab mudeli koodi ja teine seadet. Näiteks HIROMB-EST tähendab HIROMB mudeli koodi mida on rakendatud EST seadistusele.

Nagu töö peatükis "1.2. Läänemere operatiivmudelite ajalugu" kirjeldatud on mõlemad töös analüüsitud mudelid (HIROMB ja HBM) algse BSHcmod mudeli järeltulijad. Mõlemad mudelid on kolmemõõtmelised, vaba veepinnaga, barokliinsed tsirkulatsioonimudelid, mis põhinevad primitiivvõrrandite (Navier-Stokes) lahendamisel vee liikumishulga ja massi jaoks. Mudelid sisaldavad termodünaamilist jää mudelit, lisaks on HIROMB mudelis kasutusel jää dünaamika mudel. Soolsuse ja temperatuuri modelleerimiseks kasutatakse klassikalisi massi tasakaalu võrrandeid. Vertikaalse transpordi arvutamisel on eeldatud merevee hüdrostaatilist tasakaalu ja kokkusurutamatust. Horisontaalse transpordi modelleerimisel on kasutusel

Boussinesq'i lähendust, kus tiheduse gradiendid võetakse arvesse ainult gravitatsiooni komponentides. Kõrgemat järku turbulentsete liikmete horisontaalkomponentide lahendamiseks on kasutatud erinevate parametrizeeringutega Smogorinsky (1963) lähendusi ja $k-\omega$ turbulentsi sulgemisskeemi. HBM mudelis on turbulentsi sulgemisskeemi täiendatud ujuvusest tingitud geofüüsikalise vertikaalse voolamisega seotud komponentidega (Berg 2012). Soolsuse, temperatuuri ja liikumishulga vertikaalse keeriselisuse difusiooni arvutamiseks on kasutatud Canuto et al. (2002) stabiliseerimisfunktsioone. Mudelid kasutavad sfäärilisi koordinaate, mis liiguvad vastavalt Maa pöörlemisele. Mudelite arvutusvõrguna on kasutatud Arakawa C-võrku ja z-kihte (The BAL MFC group 2014).

2.1.2.1. BS01 seade

BS01 tähistab ühe meremiilise lahutusega arvutusvõrku (Funkquist ja Kleine 2007; Lagemaa 2012). Mudeli piirkond katab kogu Läänemerd, piirnedes läänepoolt Põhjameriga (9.375 °E - 30.236 °E, 53.658 °N - 65.892 °N), võrgu horisontaalsete punktide arv on 752×735 (vt Joonis 4). Alates 08.12.2009 on võrgul 50 vertikaalset kihti, kus pinnakihi paksus on 4 meetrit. Alates 20.05.2011 on atmosfääri mõjudena



Joonis 4. BS01 arvutusvõrk.

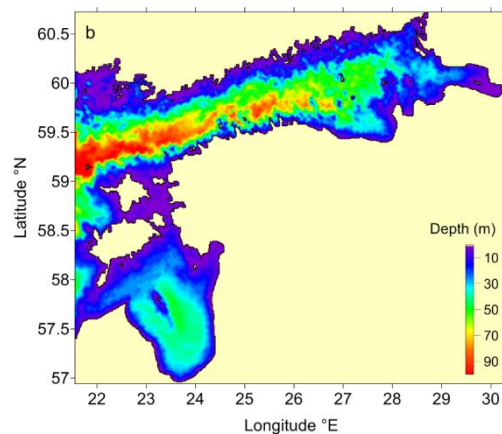
kasutatud 11 km horisontaalse lahutusega SMHI HIRLAM mudeli tulemusi (Lagemaa, Elken ja Kõuts 2011). Mudeli seade kasutab andmete assimileerimist milleks kasutatakse erinevaid mõõdetud andmeid: temperatuuri ja jää kaugsondeerimise abil saadud andmed, *in situ* vaatlused (MARNET poid, laevad).

2.1.2.2. EST seade

EST tähistab 0.5 meremiilise horisontaalse lahutusega Eesti merealade arvutusvõrku (Lagemaa 2012).

Arvutusvõrgus on 529×455 horisontaalset punkti ja võrk katab kogu Eesti rannikumerd, sealhulgas Soome ja Liivi lahed (vt Joonis 5). Vertikaalsete kihtide arv on 39, mille lahutus kuni 90 m sügavuseni on 3 meetrit. Avatud raja tingimustena kasutab EST seade HIROMB-BS01 mudeli andmeid. Atmosfääri mõjudena kasutatakse Eesti Ilmateenistuse 11 km horisontaalse lahutusega HIRLAM mudeli tulemusi.

Mudel HIROMB on operatiivses kasutuses Eestis 2009 aastast. Prognoosi arvutatakse üks kord päevas 48-ks tunniks ette ajasammuga 1 tund.

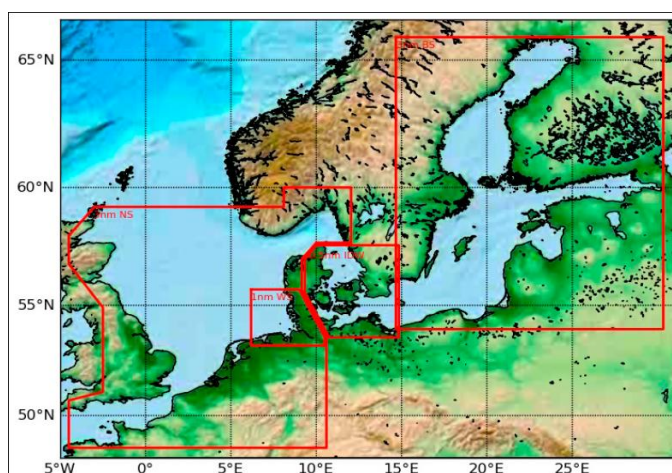


Joonis 5. EST seade arvutusvõrk.

2.1.2.3. MyO seade

MyO tähendab MyOcean projekti raames kasutatud arvutusvõrkusid üldiselt. MyO V2 on 3 meremiilise horisontaalse lahutusega arvutusvõrk, 256×258 punkti (Berg ja

Weismann Poulsen 2012). MyO V3-V5 katab 1 meremiilise horisontaalse resolutsiooniga arvutusvõrk, 767×773 punkti enamiku Läänemerest (Lagemaa, Jandt ja Huess 2014). Vertikaalsete kihtide arv on kuni 122 lahutusega 4 meetrit ülemises 100 m paksuses kihis. Taani väinade alas on horisontaalseks lahutuseks 0.5 meremiili (vt Joonis 6) (Lagemaa, Jandt ja Huess 2014). Seade avatud rada asub Põhjameres, mida katab 3 meremiilise lahutusega arvutusvõrk.



Joonis 6. HBM-MyO V2 geograafilised võrgud, DMI. Vasakult paremale: Põhjameri, Vaden meri, Taani väinade ala, Läänemeri.

2.1.2.4. Mudelite andmed

Töö käigus töödeldud andmete maht ületab 3 TB. Tabelis 2 on näha, et kõige suuremad mahud on HIROMB mudelite failidel. Põhjuseks on see, et HBM-MyO failid sisaldavad ainult 25 vertikaalset kihti, kuid HIROMB mudeli failid sisaldavad kõike mudeli arvutusvõrgus defineeritud kihte. HIROMB-EST ja HBM-EST mudeli andmed sisaldavad küll sama palju andmeid, kuid HBM-EST andmed on salvestatud NetCDF 4 pakitud formaati, mis kulutab antud juhul ligi kaks korda vähem kõvaketta ruumi, kui pakkimata GRIB formaat. MyO erinevad versioonid ilmusid järjest, seega käesoleva uuringuaja täisperiood on jagatud kolmeks erinevate pikkustega lõikudeks. Kõikide mudelite andmete ajasamm on üks tund.

Tabel 2. Mudeli andmete mahud, formaadid ja ajaperioodid.

Mudel	Maht (GB)	Formaat	Periood
HBM-EST	395	NetCDF4 zip	Täis
HBM-MyO V2	344	NetCDF	01.2012-04.2013
HBM-MyO V3		NetCDF	05.2013-06.2013
HBM-MyO V4		NetCDF	07.2013-12.2014
HIROMB-BS01	900	GRIB	Täis
HIROMB-EST	766	GRIB	Täis

2.2. Meetod

Magistritöö raames olid ette võetud järgmised sammud: andmete kogumine ja nende formaatidega tutvumine; andmetöötlus, ehk skriptide kirjutamine ja olemasolevate kasutamine; väljundpiltide tootmine; töö vormistamine.

Edasi alapeatükis on antud vastuseid järgmistele küsimustele: kuidas andmed on töödeldud, millised arvutused on tehtud esimeste tulemuste saavutamiseks, milliste kitsendustega on arvestatud tulemuste esitamisel.

2.2.1. Andmete töötlemine

Magistritöö praktiline osa on realiseeritud tarkvara MATLAB R2014a abil.

MATLAB[®] on kõrgetaseme keele ja interaktiivne keskkond, mida kasutatakse insenerid ja teadlased kogu maailmas. Tarkvara annab võimaluse uurida ning visualiseerida ideid, teha kaastööd erinevate distsipliinide raames, sealhulgas numbriline modelleerimine, erinevate rakenduste loomine, signaalide ja kujutiste töötlus, atmosfääri andmete analüüs ohtlike ilmanähtuste käitumise visualiseerimiseks².

NetCDF ja GRIB formaatides olevate andmete töötlemine oli teostatud järgmise algoritmiga: andmete sisselugemine; uute failide loomine, kuhu on koondatud ainult vajalikud parameetrid (mõõtmised ja mudelid eraldi); andmete võrdlemiseks

² <http://se.mathworks.com/products/matlab/>

mudelite ja mõõtmiste parameetrite väärtuste interpoleerimine ühe võrgu peale; statistikute arvutamine; piltide loomine.

Järgmisena on lähemalt vaadeldud mõneid algoritmi osasid.

2.2.2. Interpoleerimine

Interpoleerimise kasutamine on vajalik selleks, et mõõtmiste ja mudelite väärtused, mida võrreldakse, oleksid samades võrgupunktides.

Mõõtejaamad asetsevad kindlates kohtades maaismaal, seega valiti jaama lähima merepunkti ja interpoleeriti ruumiliselt sinna mudeli 2D võrku. Samuti kontrolliti, et ajalist nihet ei tekkiks. FerryBox-i mõõtmised muutusid nii ruumis, kui ka ajas, seega olid teostatud nii ruumiline, kui ka ajaline interpoleerimine.

Interpoleerimise meetodina oli valitud lineaarne, kus uut punkti interpoleeritakse lineaarselt vana punktide vahele igal dimensioonil (Parker et al. 1983).

2.2.3. Statistikute arvutamine

Mõõtmiste ja mudelite valideerimiseks on kasutatud järgmisi statistikuid: keskmine hälve ja standardhälve

$$\text{Bias} = \bar{x} - \bar{y}, \quad \sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^2},$$

keskmistatud ruutkeskmine hälve

$$c\text{-RMSD} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ((x - \bar{x}) - (y - \bar{y}))^2}$$

ja korrelatsioon

$$r = \sqrt{\frac{1}{N \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y} \cdot \sum_{i=1}^N (x - \bar{x}) \cdot (y - \bar{y})},$$

kus \bar{x} on mudeli ja \bar{y} on mõõtmiste aegridade arifmeetilised keskmised, N on võrreldavate väärtuste arv.

Keskmistatud ruutkeskmise hälbe c - $RMSD$ ja lihtsalt ruutkeskmise hälbe $RMSD$ erinevus seisneb selles, et c - $RMSD$ ei arvesta mudelite ja mõõtmiste keskmiste erinevust, ehk

$$RMSD^2 = c\text{-}RMSD^2 + Bias^2$$

(Lagemaa, Jandt ja Huess 2014).

2.2.4. Tulemuste visualiseerimise omapärad

Tulemuste visualiseerimiseks on koostatud tabelid, andmete aegread, erinevuste kaardid ja Taylorigrammid.

Meretaseme mõõtejaamade nimed esitatakse kindlas järjekorras, alustades Liivi lahest (Kolka, Daugavgriva, Pärnu), siis liikudes läbi Väinamere (Virtsu, Kuivastu, Triigi, Sõru, Heltermaa, Rohuküla, Lehtma); edasi tulevad viimased Eesti jaamad (Paldiski, Tallinn, Tallinnamadal, Sillamäe) ja lõpuks esitatakse ülejäänud mõõtejaamad (Kroonlinn, Peterburi, Suursaar, Helsingi).

Maksimaalse ja minimaalse merevee tasemed on esitatud aegridadena, kus kuupäevade limiidiks on valitud +/- 15 päeva ulatuses ekstreemumist.

Kuna laevade Baltic Princess ja Silja Europa trajektoorid on põhja-lõuna suunalised ja ülejäänutel laevadel on nad enam-vähem lääne-ida suunalised, siis temperatuuri ja soolsuse kaarte kahe esimese laeva korral koostati mööda pikkuskraadi ja teiste laevade korral mööda laiuskraadi.

Taylorigrammi aluseks on koosinusteoreem, kus kasutatakse erinevaid statistikuid. Kui σ_x ja σ_y on mudeli ja mõõtmiste standardhälbed, r on korrelatsioon, siis kehtib

$$c\text{-}RMSD^2 = \sigma_x + \sigma_y - 2 \cdot \sigma_x \cdot \sigma_y \cdot r$$

(Taylor 2001).

3. TULEMUSED

Selles peatükis on esitatud töö tulemused, mille visualiseerimiseks on koostatud andmete aegread, erinevuste kaardid, tabelid ja Taylori diagrammid. Peatükk on jagatud uuritavate parameetrite järgi.

3.1. Meretase

Meretase uurimiseks oli valitud kolm veetaseme jaama: Pärnu, Tallinna ja Peterburi jaamad. Iga jaama kohta on esitatud maksimaalne ja minimaalne meretase kolmekümne päevalises vahemikus ja Taylori diagramm. Alapunkti lõpus on esitatud veetaseme jaamade kokkuvõtlik tulemus.

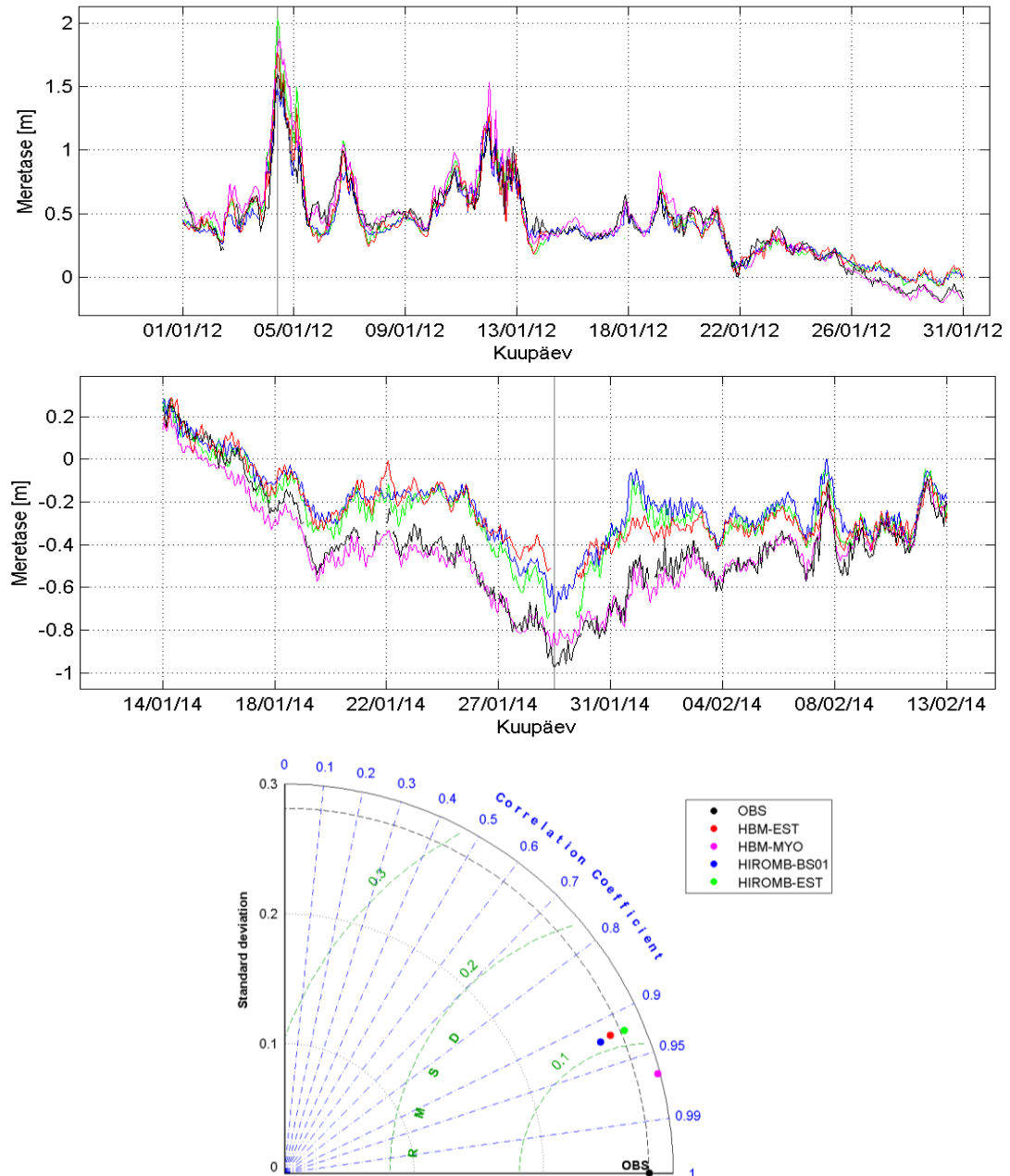
3.1.1. Meretase Pärnu meretaseme jaamas

Uurimisperioodi maksimaalne meretase, 1.60 meetrit, esines Pärnu jaamas 04.01.2012 kell 16:00 UTC ja minimaalne, -0.98 meetrit, kuupäeval 29.01.2014 kell 04:00 UTC (vt Joonis 7).

Jooniselt 7 on näha, et mudelid on heas korrelatsioonis mõõtmistega. Mudelid käituvad väga sarnaselt kõrge veetaseme modelleerimisel, HBM-EST, HBM-MyO ja HIROMB-EST (vastavalt 1.77, 1.80 ja 2.03 meetrit) ülehindavad ja HIROMB-BS01 (1.48 meetrit) alahindab maksimaalset meretaset ligikaudu 0.2 meetri võrra (HIROMB-EST ligikaudu 0.4 meetri võrra). Minimaalse veetaseme hindamisel kõik modelleeritud väärtused on mõõdetud meretasemest kõrgemad, seejuures HBM-MyO tulemus -0.81 meetrit on kõige täpsem. HIROMB-BS01 näitab, et antud kuupäeval meretase oli -0.71 meetrit. Minimaalse meretaseme prognoos on kõige ebatäpsem HBM-EST mudelis (-0.5 meetrit), mis on mõõdetud meretasemest poole

meetri võrra väiksem. HIROMB-EST miinimum punkti väärtus on HBM ja HIROMB-BS01 mudelite vahel.

Taylori diagrammist on näha, et HBM-MyO mudeli näitajad on parimad, näiteks



Joonis 7. Veetaseme jaama **Pärnu** maksimaalne (üleväl) ja minimaalne (keskel) meretase, aegread on esitatud +/- 15 päeva ulatuses ekstreemumist. Hall joon näitab mõõtmiste maksimumi või miinimumi. Taylori diagramm on all.

ruutkeskmise hälve *RMSD* on väiksem, kui teistel mudelitel. HBM-MyO mudeli korrelatsioon r on ligikaudu 96%, ülejäänutel mudelitel on ligikaudu 92%. HIROMB-EST mudelil on kõige täpsem standardhälve (0.28) (mõõtmistel $\sigma = 0.3$).

3.1.2. Meretase Tallinna meretaseme jaamas

Uuritava ajaperioodi maksimaalne (0.92 meetrit) ja minimaalne (-0.96 meetrit) meretase Tallinna jaamas leidis aset vastavalt 04.01.2012 kell 15:00 UTC ja 19.03.2013 kell 18:00 UTC (vt Joonis 8).

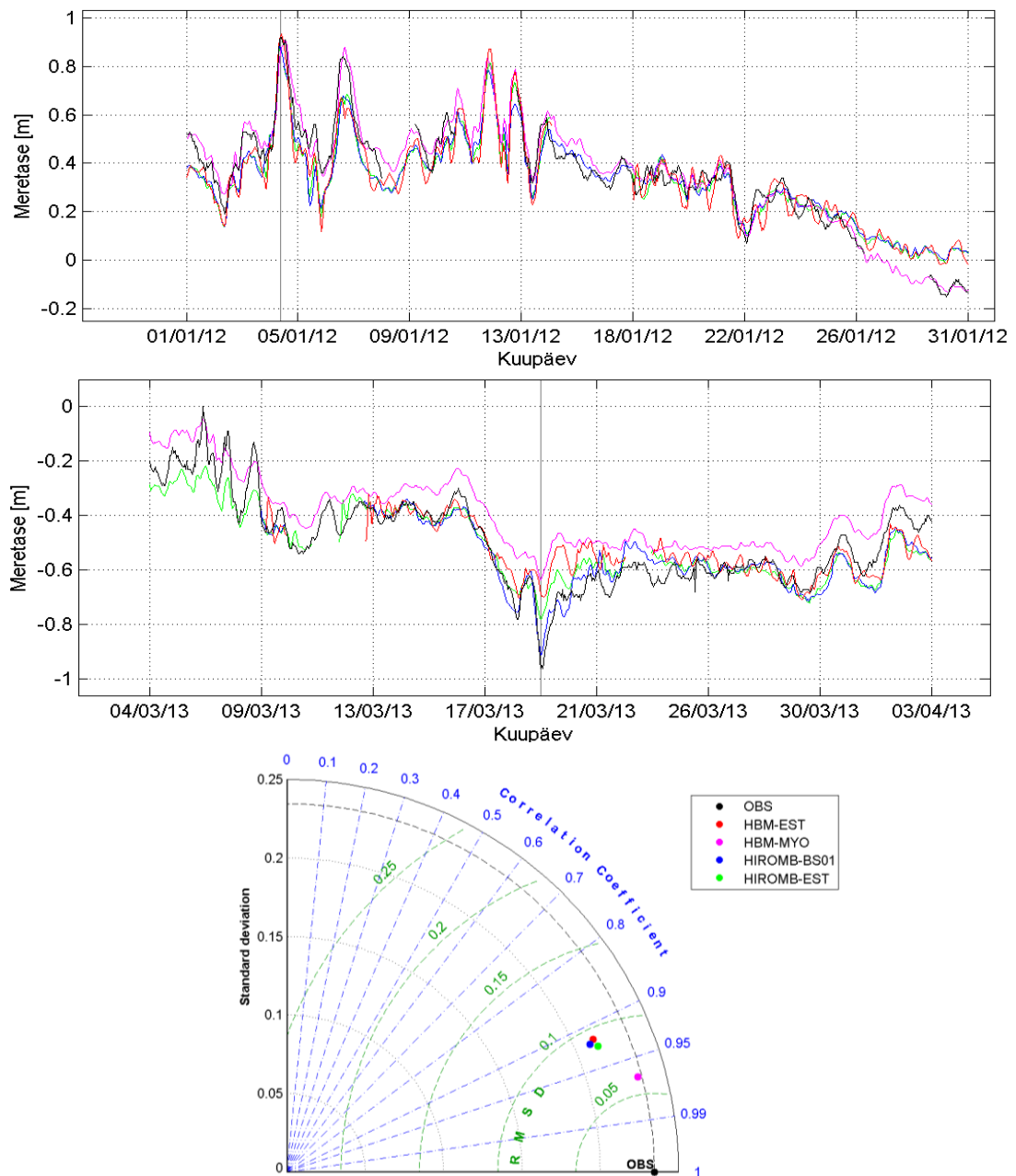
Vaatamata sellele, et HBM-MyO mudel hindab maksimaalset veetaset väga täpselt (0.85 meetrit) ja kirjeldab ajavahemikus 01.-17.01.2012 esinenud tormiperioodi küllaltki täpselt, on jooniselt näha, et mudel hindab oluliselt rahulikul perioodil tehtud mõõtmisi üle. Antud juhul näitab kõige paremat tulemust vaadeldavas tipus HBM-EST mudel (0.92 meetrit). Ka ülejäänud mudelid näitavad head kokkulangevust mõõtmistega maksimumi punktis, kuid nad kipuvad alahindama tegelikke väärtusi teistel päevadel.

Minimaalse veetaseme hindamise tulemused on sarnased Pärnu veetaseme jaamaga: modelleeritud meretase on kõrgem, kui tegelikkus. HIROMB-BS01 mudeli tulemus -0.91 meetrit on minimaalse meretaseme ajal kõige täpsem. Kõige ebatäpsem prognoos on HBM-MyO mudelis (-0.64 meetrit), mis on ligikaudu 0.32 meetri võrra väiksem, kui mõõdetud meretase. EST seadega mudelite veetase on sarnane ja asetseb üldiselt teiste mudelite vahel.

Taylori diagramm näitab, et HBM-MyO mudel korreleerub mõõtmistega kõige paremini. Ülejäänud mudelid näitavad omavahelises võrdluses väga lähedast tulemust. Näiteks kolme ülejäänud mudeli korrelatsioon r on ligikaudu 92% ja standardhälve ligikaudu 0.21 (mõõtmistel $\sigma = 0.23$).

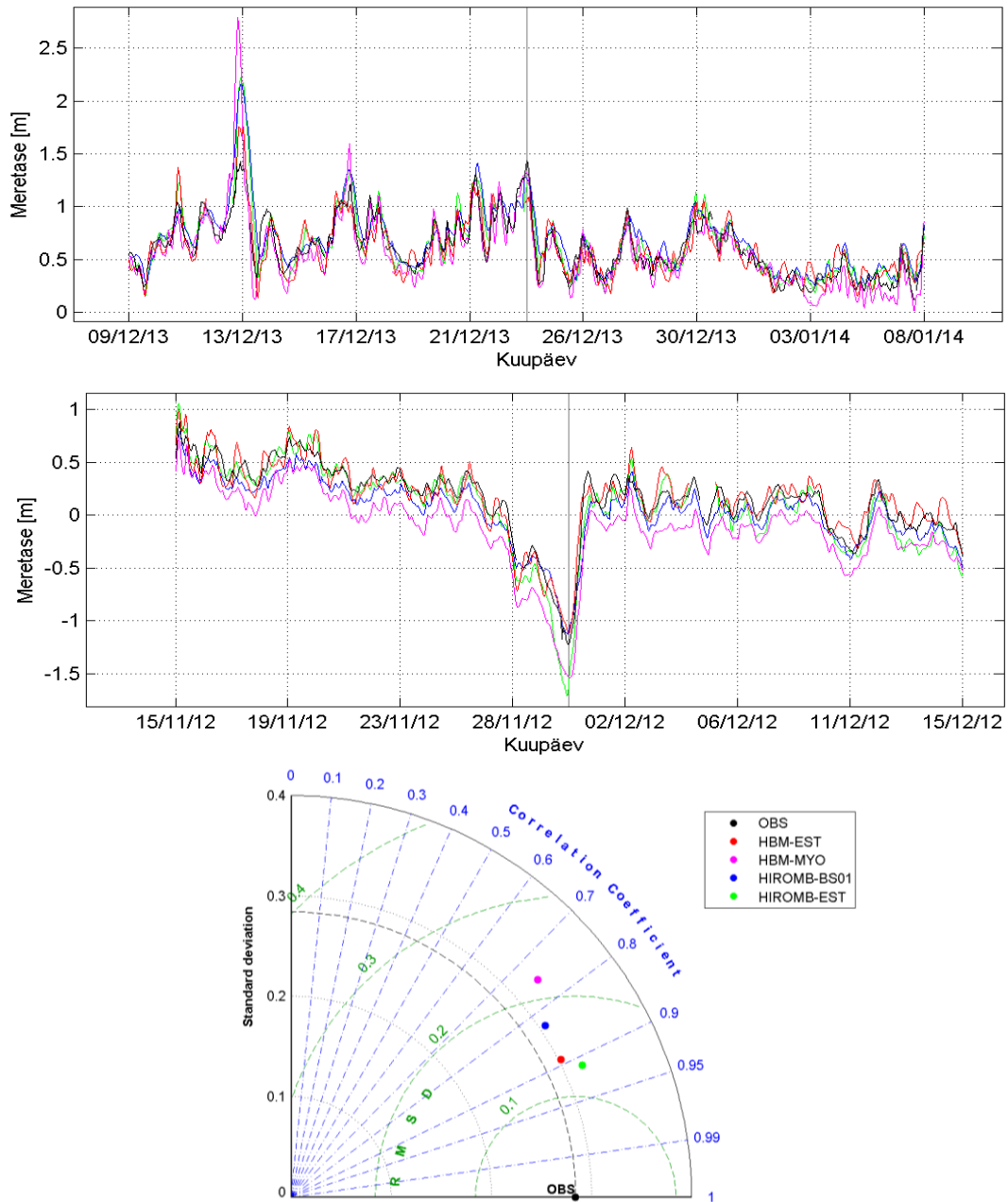
3.1.3. Meretase Peterburi meretaseme jaamas

Kuupäeval 24.12.2013 kell 02:00 UTC oli maksimaalne meretase Peterburi jaamas 1.44 meetrit ja kuupäeval 30.11.2012 kell 10:00 UTC oli minimaalne veetase -1.22 meetrit (vt Joonis 9).



Joonis 8. Veetaseme jaama Tallinn maksimaalne (üleval) ja minimaalne (keskel) meretase, aegread on esitatud +/- 15 päeva ulatuses ekstreemumist. Hall joon näitab mõõtmiste maksimumi või miinimumi. Taylori diagramm on all.

Jooniselt on näha, et kõik mudelid hindavad meretaseme maksimaalse punkti väga täpselt ja käituvad sarnaselt kolmekümne päeva jooksul selle ümbruses. Huvitav on see, et 13.12.2013 prognoosivad kõik mudelid järsku veetaseme tõusu, HBM-MyO



Joonis 9. Veetaseme jaama Peterburi maksimaalne (üleval) ja minimaalne (keskel) meretase, aegread on esitatud +/- 15 päeva ulatuses ekstreemumist. Hall joon näitab mõõtmiste maksimumi või miinimumi. Taylorigramm on all.

2.79 meetrit ja HIROMB mudelid ligikaudu 2.20 meetrit. HBM-EST mudeli tulemus 1.76 meetrit on kõige madalam. Mõõdetud maksimaalne meretase samal kuupäeval

oli 1.43 meetrit, mis on rohkem kui ühe meetri võrra madalam, kui prognoositud väärtus HBM-MyO mudelis.

Pooled mudelitest alahindavad meretaseme miinimumi keskmiselt 0.34 meetri võrra (HBM-MyO mudeli järgi meretase on -1.53 meetrit ja HIROMB-EST mudeli põhjal -1.59 meetrit). HBM-MyO alahindab veetaset kogu kolmekümne päevase perioodi jooksul minimaalse meretaseme ümbruses. Sama kehtib ka HIROMB-BS01 puhul, kuid minimaalne punkt on prognoositud viimase mudeli abil täpsusega 10 cm (ligikaudu -1.09 meetrit).

Taylori diagrammi põhjal on HBM-MyO mudel kõige ebatäpsem, kuna tema ruutkeskmine hälve ja standardhälve on kõige suuremad ($RMSE = 0.22$, $\sigma = 0.33$) ja korrelatsioon $r = 0.75$ väiksem, kui teistel mudelitel. EST mudelid kajastavad mõõtmisi kõige paremini, HIROMB-EST korrelatsioon on $r = 0.92$ ja HBM mudelil on kõige täpsem standardhälve $\sigma = 0.30$ (mõõtmistel $\sigma = 0.28$). Üldiselt näitavad mudelid väga erinevaid tulemusi, kui võrrelda neid omavahel.

3.1.4. Meretase kõikides jaamades

Joonis 10 on graafilisel kujul esitatud tabel, mis kajastab erinevate veetaseme jaamade tulemuste statistikuid.

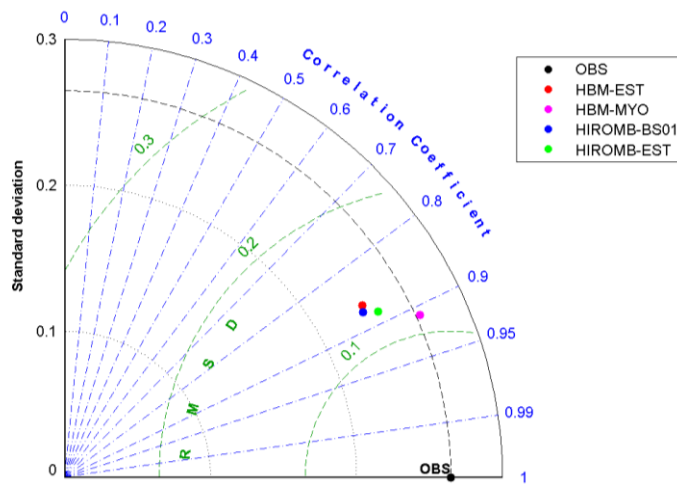
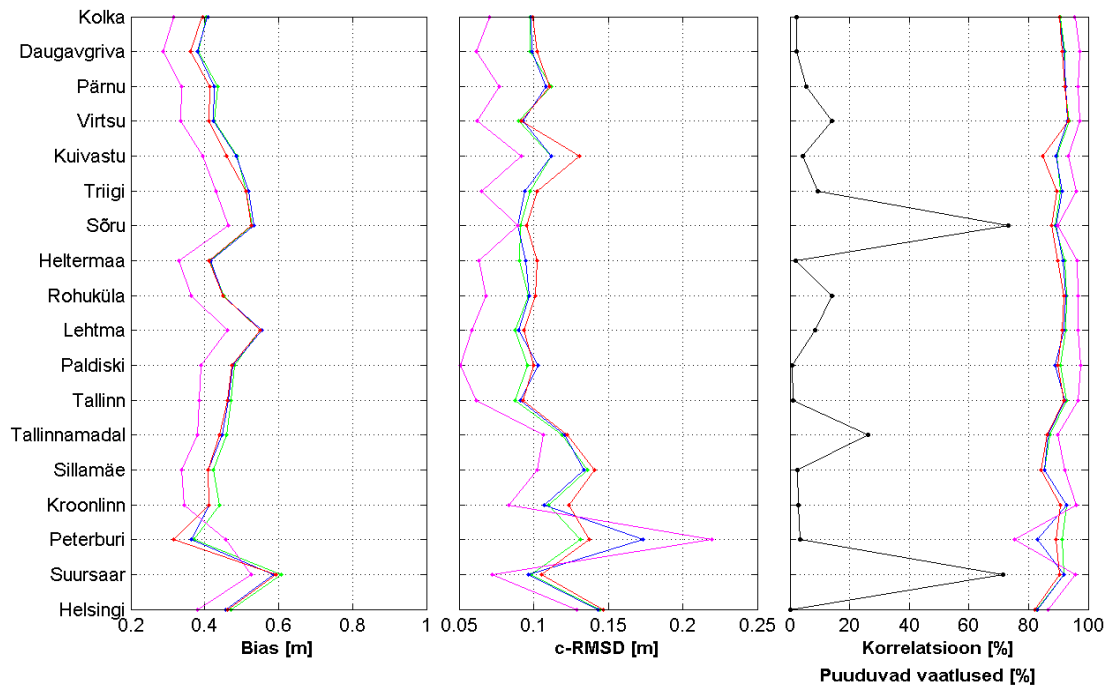
Jooniselt on näha, et HBM-MyO mudelil on kõige parimad näitajad, st keskmised ja ruutkeskmised hälbed on üldiselt kõige madalamad, korrelatsioonid on kõrgeimad.

Keskmise hälbe ruumiline jaotus (muutus esimesest jaamast kuni viimaseni) on stabiilne, võnkudes 0.28 kuni 0.53 meetri vahel HBM-MyO korral ja 0.32 kuni 0.59 meetri vahel ülejäänute mudelite korral. Konkreetsemalt, modelleeritud meretaseme keskmine hälve kasvab Kolka jaamast kuni Sõru jaamani ja edasi väheneb. Kõige suuremad keskmised hälbed on Lehtma ja Suursaare jaamades.

Keskmistatud ruutkeskmine hälve on kõige muutlikum HBM-MyO mudelis, näiteks Paldiski jaamas ta on 0.05 meetrit, aga Peterburi jaamas ligikaudu 0.22 meetrit. Meretase Paldiski jaamas tundub olevat väga hästi modelleeritav, kuivõrd ka varasemad tööd on leidnud, et prognoos selles jaamas on Eesti ranniku täpseim (Lagemaa 2012). Teiste mudelite tulemusi vaadates on näha, et mudelite

keskmistatud ruutkeskmised hälbed on peaaegu samad, suurimad erinevused mudelite vahel on Kuivastu, Kroonlinna, Peterburi ja Suursaare jaamades.

Graafikust (vt Joonis 10, parempoolne paneel) on näha, et kõige rohkem puuduvaid mõõtmisi on Sõru, Rohuküla, Tallinnamadala ja Suursaare jaamadel.



Joonis 10. Üleval: Keskmine hälve (bias), ruutkeskmine hälve (*c-RMSD*), korrelatsioon ja puuduvad vaatlused (must joon) erinevates veetaseme jaamades. All: kõikide veetaseme jaamade keskmine Taylori diagramm.

Korrelatsioon kõikide mudelite korral on peaaegu samasugune (HBM-MyO korrelatsioon on suurem iga jaama korral), suuremad erinevused esinevad Kuivastu ja Peterburi jaamades.

Kokkuvõtvalt, Tayloriga diagrammist on selgelt näha, et HBM-MyO mudel prognoosib meretaset keskmiselt kõige täpsemini, kuid eraldi jaamade analüüs näitas, et ta paljudel juhtudel kõnealune mudel veidi ülehindab nii maksimaalset, kui ka minimaalset veetaset, seega maksimaalne veetase on suurem ja minimaalne väiksem, kui tegelikkus.

3.2. Pinnatemperatuur

Ülevaatlikkuse säilitamiseks on temperatuuri võrdluse tulemuste esitamiseks valitud kolm FerryBox süsteemiga laeva: Finn Maid, Silja Europa ja Romantika2. Iga laeva korral on esitatud tema perioodi aegread ja temperatuuride ning selle erinevuste kaardid, mis näitavad mõõtmisi ja mudeleid erinevatel aegadel. Silja Europa punktid on esitatud laiuskraadil, ülejäänute laevade punktid pikkuskraadil. Kõikide uuritud kuue laeva FerryBox-ide temperatuuri andmete kokkuvõttev Taylori diagramm on esitatud selle alapeatüki lõpus.

3.2.1. Temperatuur Finn Maid trajektoiril

Joonis 11 on kujutatud vaadeldava FerryBox-i temperatuuride ja erinevuste kaardid. Kasutatud mõõtmiste ajaperiood algab 19.01.2012 ja lõpeb 20.12.2014.

Kaardid näitavad, et mudelid korreleeruvad mõõtmistega kvalitatiivselt hästi, seega mudelites on olemas sesoonne muutlikkus. Konkreetsemalt, nii mõõtmiste, kui ka mudelite temperatuuride kaartidelt on näha, et talvel toimub vee pinnakihi külmenemine ja suvel soojenemine. Kõige kõrgem temperatuur 22.8 °C oli fikseeritud 07.08.2014 kell 14:00 UTC ja kõige madalam -0.28 °C kuupäeval 08.03.2012 kell 18:30 UTC.

Modelleeritud maksimaalne pinnakihi temperatuur on kahel esimesel mudelil (vt Joonis 11, parempoolne osa) väiksem keskmiselt 0.3 °C võrra ja teistel keskmiselt

0.7 °C võrra suurem, kui tegelik temperatuur. Maksimaalse temperatuuri esinemise päeval on kõige täpsem HBM-EST mudel, mis prognoosib 22.7 °C ja kõige ebatäpsem HIROMB-EST, mille tulemus on 23.8 °C.

Minimaalne temperatuur on alahinnatud vähemalt 0.05 °C võrra kõikides mudelites. Kõige külmemat vett temperatuuriga ligikaudu -0.4 °C prognoosivad HIROMB mudelid. HBM mudelite prognoos erineb üksteisest 0.04 kraadi võrra, HBM-MyO mudeli tulemus on -0.33 °C ja HBM-EST mudelil -0.37 °C.

Erinevuste kaarte vaadates saab näha, et mõõtmisperioodi algusel ja ka teisel talvel (jaanuar 2013) on kõige rohkem mudelite ja mõõtmiste kokkulangevusi. Üldiselt, suvine temperatuur on mudelites ülehinnatud ja talvine alahinnatud.

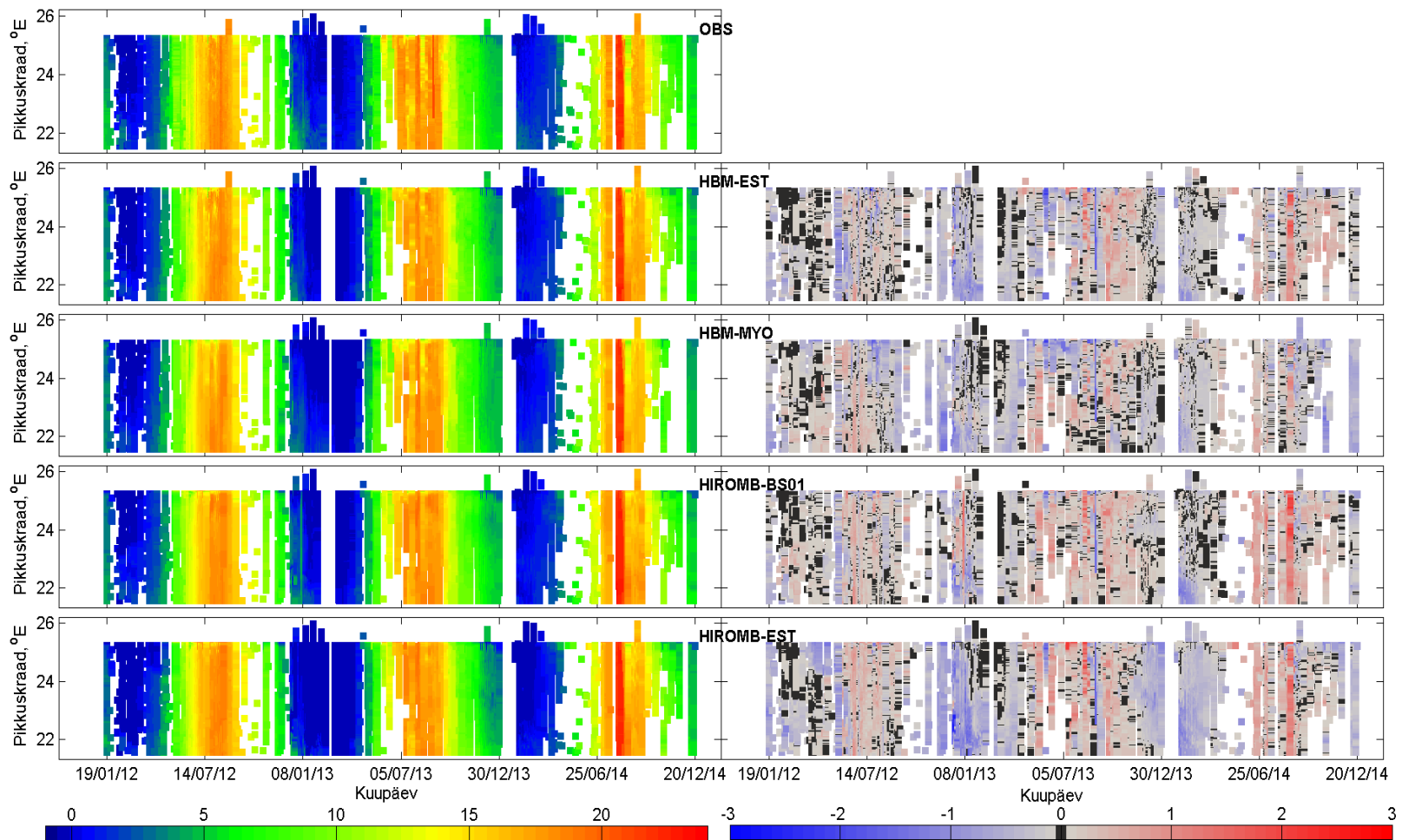
Mõõtmiste ja mudelite aegread näitavad head kokkulangevust kogu uuritava perioodi ulatuses (vt Joonis 12). Kõikide mudelite korreleerumine mõõtmistega on väga kõrge (r on ligikaudu 99%). Suurim standardhälve 7.3 °C on HIROMB-BS01 mudelis (mõõtmiste puhul $\sigma = 6.7$).

3.2.2. Temperatuur Silja Europa trajektoiril

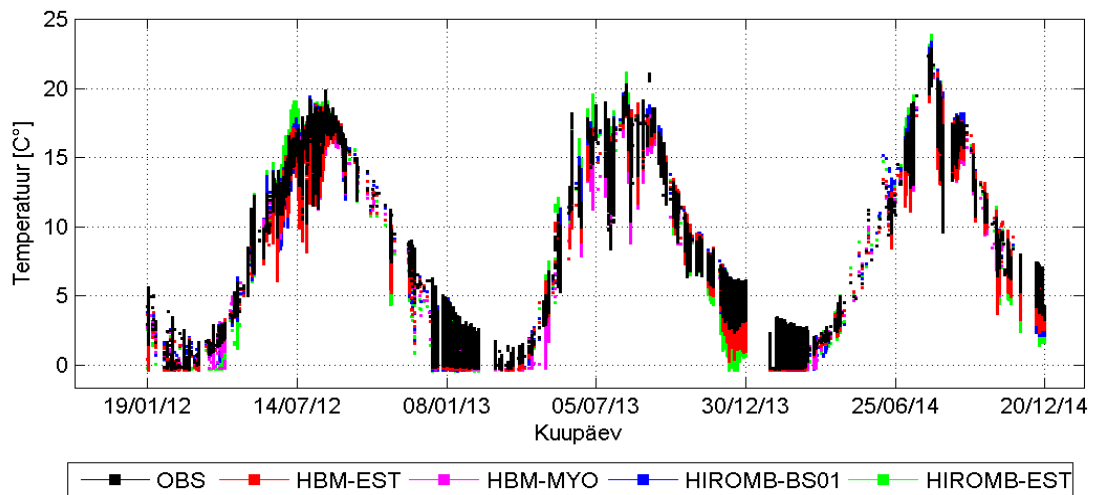
Töös kasutatud FerryBox Silja Europa vee pinnatemperatuurid olid mõõdetud ühe aasta jooksul, perioodil 15.07.2013 kuni 22.07.2014 (vt Joonis 13).

Temperatuuri kaardist on hästi näha, kuidas jaotuvad pinnakihi temperatuurid mudelites ja mõõtmistel. Sarnaselt Finn Maid temperatuuri mõõtmistega on ka Silja Europa temperatuurikaardil selgelt kujunenud sesoonsed temperatuuride erinevused, st talvel vee temperatuur läheneb nullile ja mõlemal suvel liigub üle 20 °C nii mõõtmiste, kui ka mudelite korral.

Kuna antud ajaperioodil on üks talvine vahemik, siis saab vaadelda minimaalse temperatuuri, mis on fikseeritud 06.02.2014 kell 13:00 UTC ja on võrdne -0.3 °C. Mudelid alahindavad temperatuuri miinimumi. Suurim erinevus mõõtmistega, mis on võrdne ligikaudu 0.1 kraadiga, on HIROMB-BS01 mudelil. Kõige parem tulemus on saavutatud HBM-MyO mudeli abil (-0.29 °C).



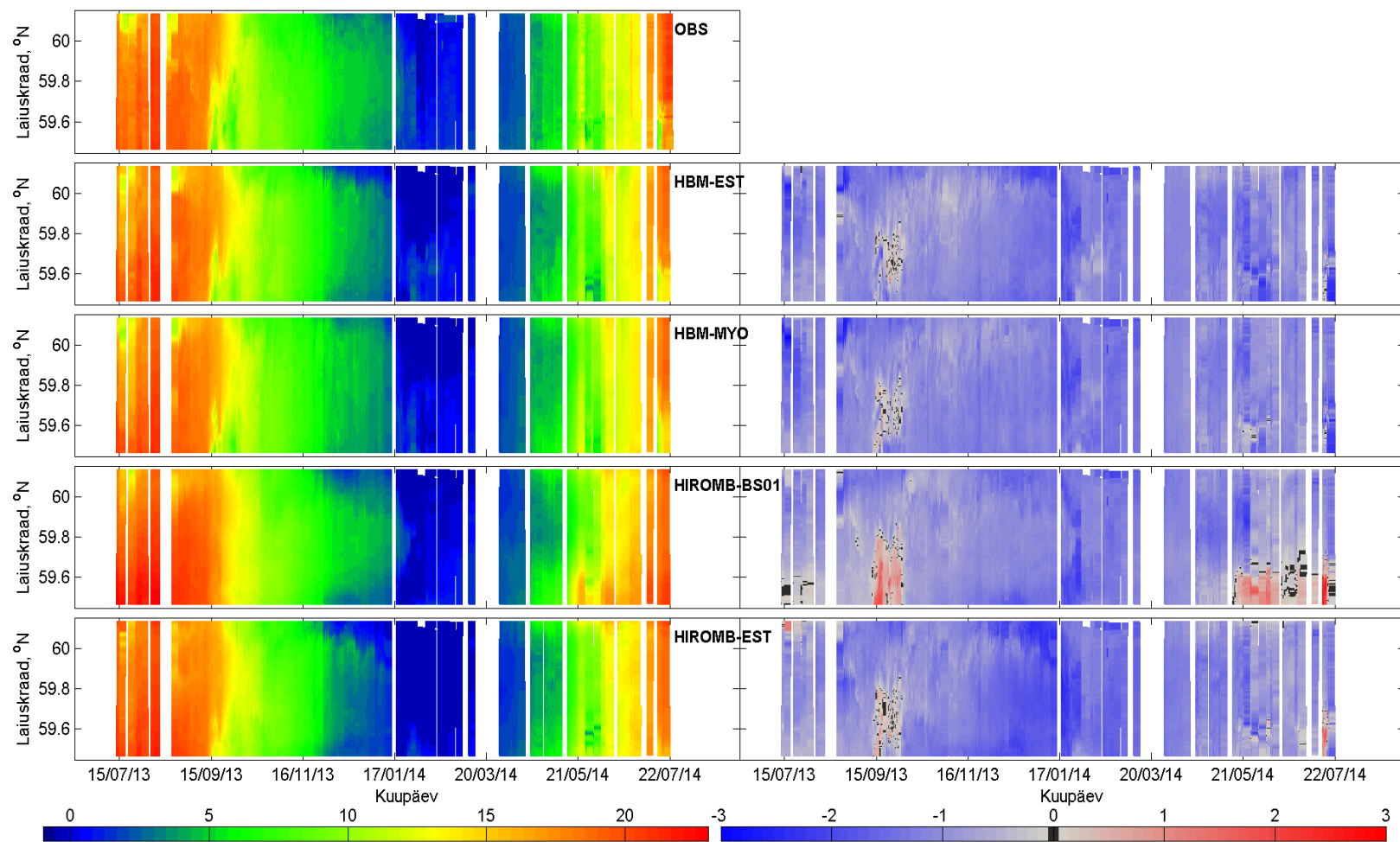
Joonis 11. FerryBox **Finn Maid** temperatuur °C (vasakul) ja temperatuuri erinevused vaatlustest OBS (paremal). Erinevused on arvatud kui mudel – vaatlus.



Joonis 12. FerryBox **Finn Maid** temperatuuri aegread.

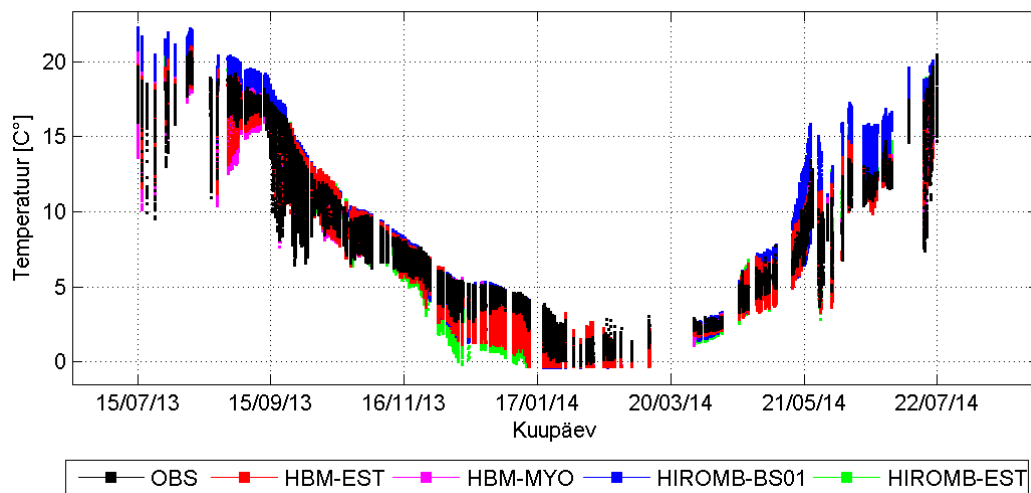
Edasiseks analüüsiks valiti soojema perioodi kuupäev, kus temperatuuride erinevused on nähtavad ja vaatlustest on näha *upwelling*-u esinemist Tallinna piirkonnas, näiteks kuupäeval 28.05.2014 mudelid erinevad nähtavalt üksteisest. Valitud kuupäeval kell 10:00 UTC on mõõdetud pinnatemperatuur 7.2 °C. HBM mudelite tulemused on ligikaudu 4.5 °C ja 8.4 °C, HIROMB mudelid prognoosisid 13.7 °C ja 6.8 °C (vastavalt jJoonis 13 toodud nimede järjekorrale). Andmetest lähtuvalt EST mudelid alahindavad mõõtmisi keskmiselt 2 kraadi võrra, HIROMB-BS01 ülehindab tegeliku temperatuuri rohkem, kui 6 kraadi võrra. Antud juhul on kõige täpsem HIROMB-EST, mis oli tegelikust temperatuurist väiksem ainult 0.4 °C võrra.

Erinevuste kaardid näitavad, et üldiselt kõik mudelid prognoosivad külmemat vett, kui tegelikkus (erinevus on suurem, kui üks kraad). Aasta 2013 septembris on näha ka modelleerimise tulemuste kokkulangevust mõõtmistega, samal ajal HIROMB-BS01 mudel ülehindab temperatuuri sellel kuul ja ka perioodi lõpus.



Joonis 13. FerryBox Silja Europa temperatuur °C (vasakul) ja temperatuuri erinevused vaatlustest OBS (paremal). Erinevused on arvatud kui mudel – vaatlus.

Mõõtmiste ja mudelite aegread näitavad rahuldavat kokkulangevust kogu uuritava perioodi jooksul (vt Joonis 14). Suveajal HIROMB-BS01 kipub ülehindama temperatuuri, talveajal kõik modelleeritud temperatuurid on väiksemad, kui mõõtmised. Kõige paremini korreleeruvad mõõtmistega HBM mudelid. HIROMB mudelitel on suurim standardhälve, võrreldes teiste mudelite ja mõõtmistega.

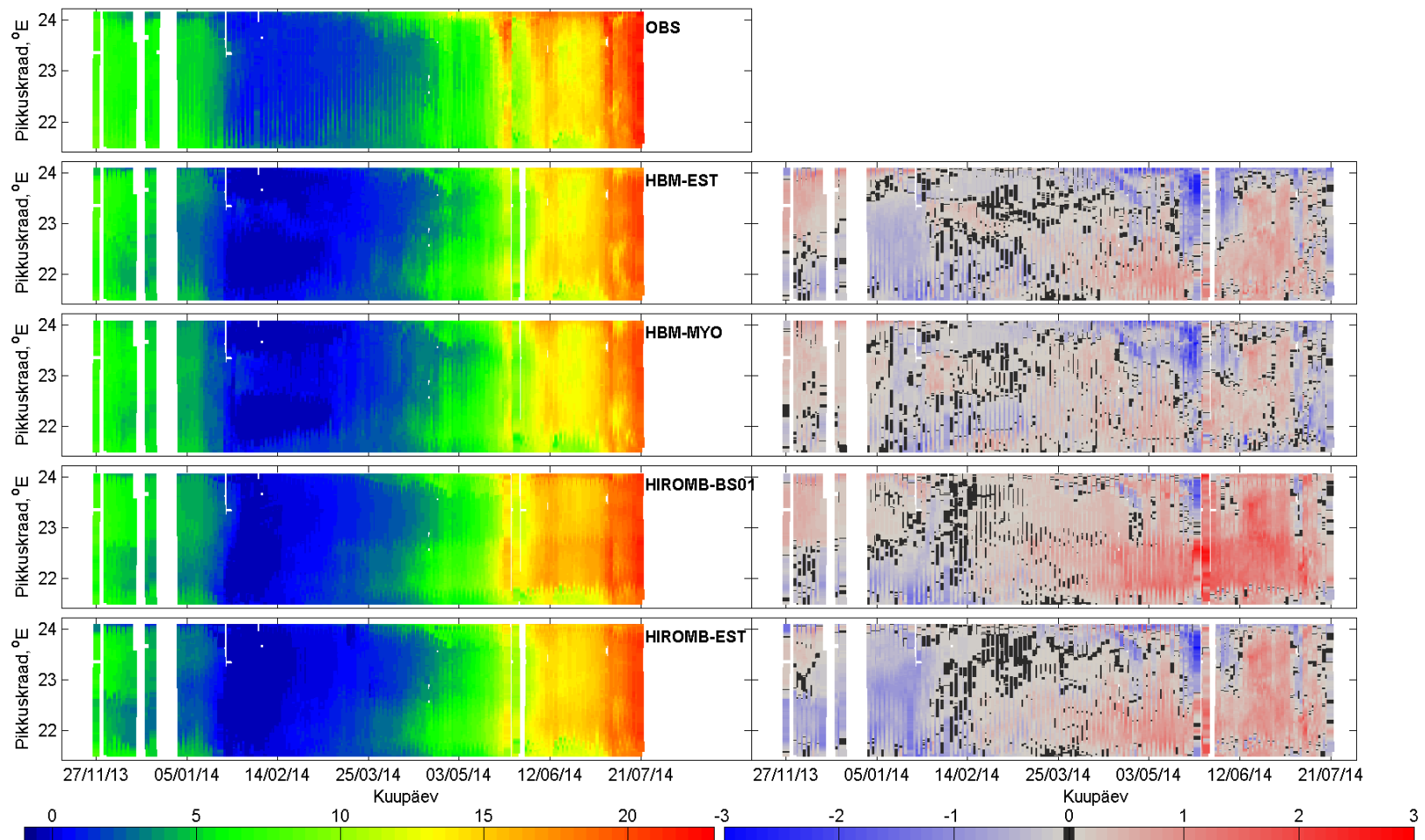


Joonis 14. FerryBox Silja Europa temperatuuri aegread.

3.2.3. Temperatuur Romantika2 trajektoiril

Kasutatud FerryBox Romantika2 vee pinnatemperatuurid on mõõdetud perioodil 27.11.2013 kuni 21.07.2014, seega perioodi sisse kuulub täielik talv ja suve esimene pool (vt Joonis 15).

Temperatuuri kaart näitab üldiselt, et mudelid korreleeruvad mõõtmistega rahuldavalt, samuti on selgelt eristatav talveperiood ja suve algus. Mõõtmiste miinimaalne väärtus vaadeldavas ajavahemikus on fikseeritud 30.01.2014 kell 22:00 UTC ja on võrdne 0.35 °C. Kõik mudelid alahindavad mõõdetud miinimumi keskmiselt 0.7 kraadi võrra. HIROMB mudelid on kõige ebatäpsemad, nende abil modelleeritud temperatuur on -0.4 °C. Vaadeldatavatest mudelitest on HBM-MyO mudel parim minimaalse temperatuuri prognoosimisel (-0.35 °C).

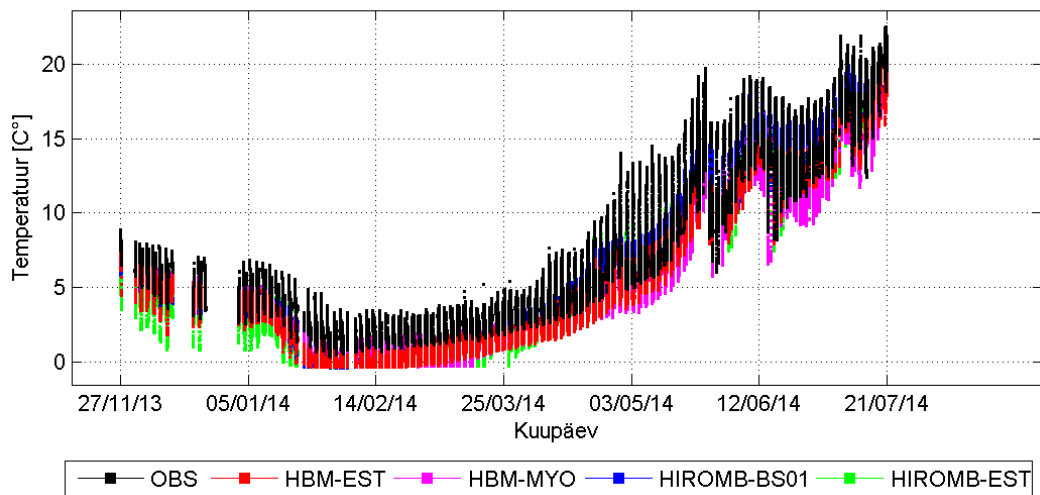


Joonis 15. FerryBox **Romantika2** temperatuur °C (vasakul) ja temperatuuri erinevused vaatlustest OBS (paremal). Erinevused on arvatud kui mudel – vaatlus.

Maksimaalne pinnatemperatuur on mõõdetud kuupäeval 21.07.2014 kell 16:00 UTC ja on võrdne 22.5 °C. Mudelite tulemused on üldiselt väiksemad, näiteks EST mudelid prognoosivad antud kuupäeval keskmiselt 20.3 °C, HBM-MyO mudeli väärtus on kõige madalam ja on ligikaudu 20.0 °C. Mudeli BS01 tulemus (ligikaudu 21.4 °C) on kõige lähedamal mõõtmistele, erinevusega -1.1 kraadi.

Erinevuste kaardid (vt Joonis 15, parempoolne osa) näitavad, et FerryBox Romantika2 mõõtmised on modelleeritud suurima kokkulangevuse arvuga jaanuarist kuni aprillini. HIROMB mudelid ülehindavad temperatuuri alates aprillist kuni perioodi lõpuni, BS01 erinevus mõõtmistest selles lõigus on eriti suur (üle 1.5 kraadi). Igal mudelil on oluliselt alahinnatud aasta 2014 maikuu temperatuur, kus leidis aset erakordselt järsk kevadine soojenemine.

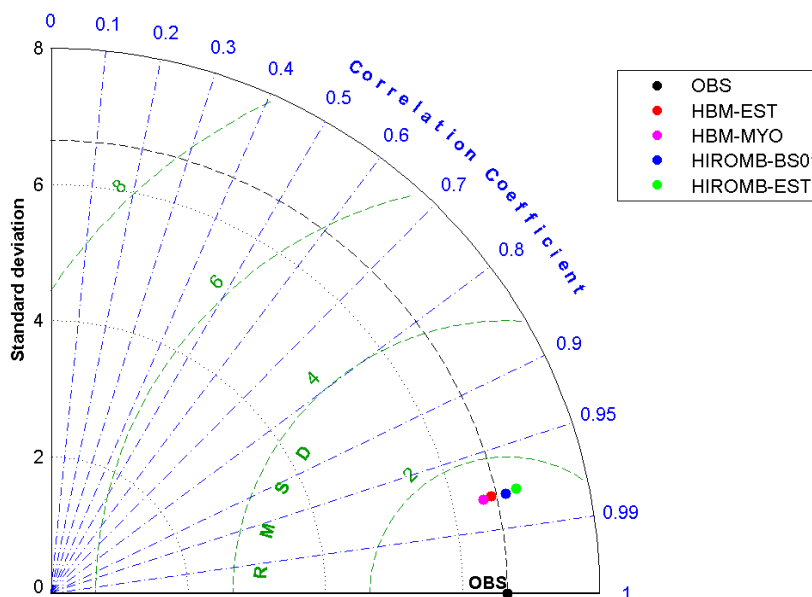
Mõõtmiste ja mudelite aegread näitavad, et temperatuuride tendentsid on esindatud kõikides mudelites (vt Joonis 16). Mudelitel on sarnane ruutkeskmine hälve (ligikaudu 2 kraadi) ja korrelatsioon (ligikaudu 0.96). HBM-MyO mudeli standardhälve erineb mõõtmistest kõige rohkem (andmed on vastavalt 6.3 ja 7.5).



Joonis 16. FerryBox **Romantika2** temperatuuri aegread.

3.2.4. Temperatuur kõikide FerryBox-ide trajektooridel

Kokkuvõttes, üldisest Taylori diagrammist (vt Joonis 17) on näha, et mudelitel on lähedane ruutkeskmine hälve ja korrelatsioon, standardhälbed erinevad mõõtmistest suuremal määral HBM-MyO ja HIROMB-EST mudelitel. Seega HBM-EST ja HIROMB-BS01 mudelid on antud juhul kõige täpsemad.



Joonis 17. Kõikide FerryBox temperatuuride Taylori diagramm.

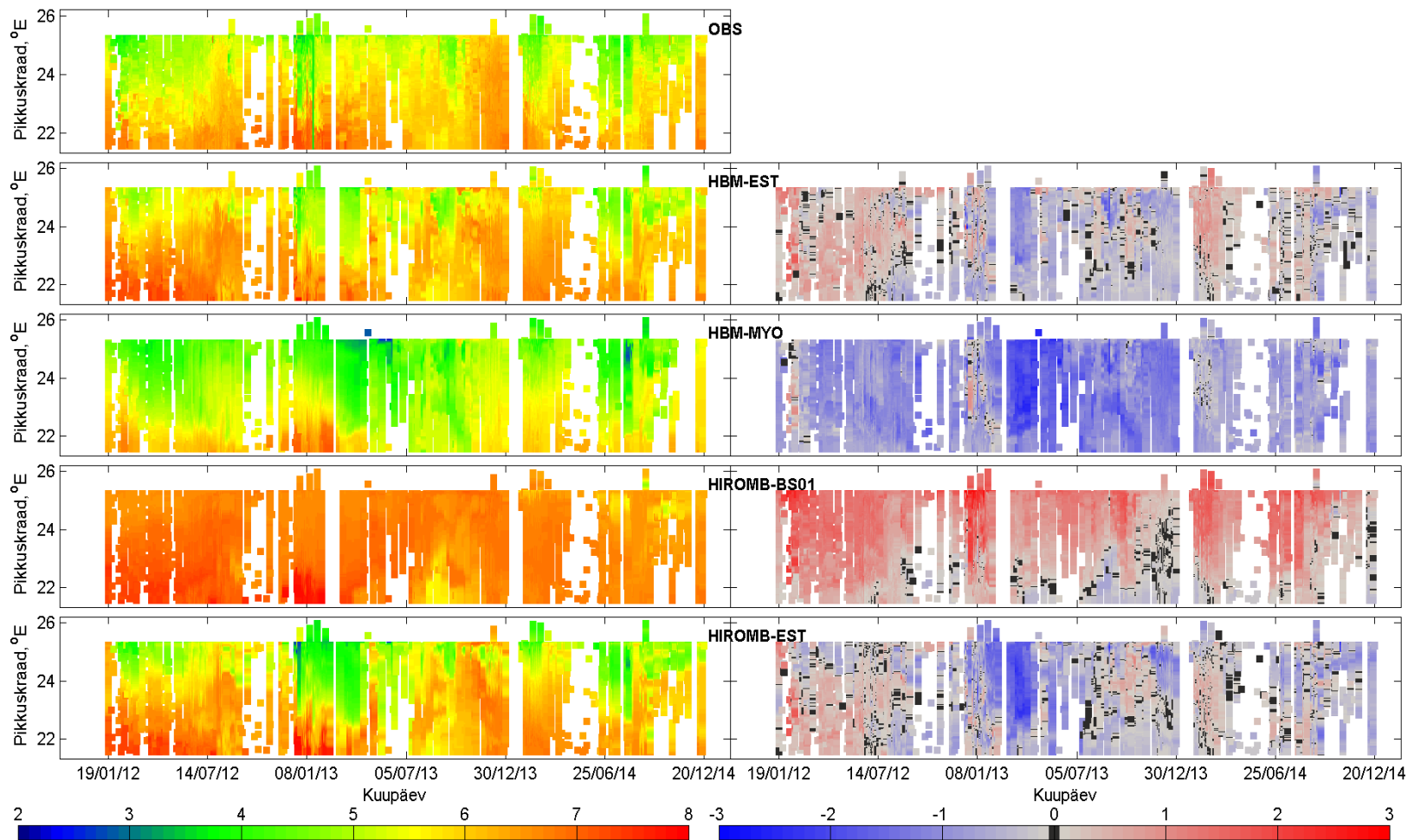
3.3. Pinnasoolsus

Selles alapeatükis on esitatud soolsuse aegread, kaardid ja erinevused kolme erineva FerryBox korral. Laevade valik on sama, mis temperatuuri uurimisel. Alapeatüki lõpus on esitatud kõikide laevade soolsuste Taylori diagramm.

3.3.1. Soolsus Finn Maid trajektoiril

Joonis 18 on esitatud Finn Maid FerryBox soolsuste ja erinevuste kaardid.

Mõõtmiste kaardilt on näha, et pikkuskraadidel 24-26 °E soolsus on üldiselt väiksem, kui teistes kohtades. EST mudelid jälgivad seda jaotust väga hästi. MyO mudel nähtavalt alahindab soolsust kogu perioodi jooksul, BS01 vastupidi.

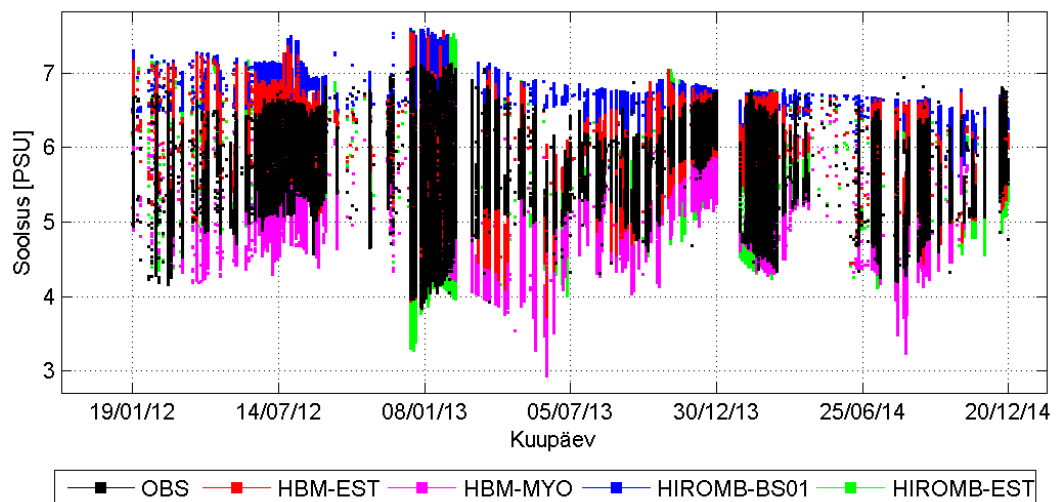


Joonis 18. FerryBox **Finn Maid** soolsus PSU (vasakul) ja soolsuse erinevused vaatlustest OBS (paremal). Erinevused on arvatud kui mudel – vaatlus.

Maksimaalne soolsus 7.12 PSU on fikseeritud 10.02.2013 kell 00:13 UTC pikkuskraadil 21.6 °E ja minimaalne 3.84 PSU kuupäeval 04.01.2013 kell 16:13 UTC pikkuskraadil 25.2 °E. Suurim soolsus MyO mudeli järgi on 7.00 PSU, ülejäänute mudelite järgi tulemus on vahemikus 7.56-7.58 PSU. Vähima soolsuse modelleerimisel on HBM-EST kõige täpsem (3.73 PSU), kõige kehvam tulemus (5.10 PSU) on BS01 mudelil, ülejäänute mudelite tulemused on sarnased ja on vahemikus 2.94-3.02 PSU.

Erinevuste kaartidest saab näha, et suurim arv kokkulangevusi on EST mudelites (vt Joonis 18, parempoolne osa). Antud mudelid üle- ja alahindavad mõõtmisi samades kohtades, näiteks perioodi esimesel ja viimasel kolmandikel modelleeritud soolsus on suurem kuni 1 PSU võrra (HIROMB puhul kuni 2 PSU võrra aasta 2012 jaanuaris).

Aegridade jooniselt on näha, et HIROMB mudelid on kõige ebatäpsemad, BS01 ülehindab alati ja EST alahindab tegelikku soolsust (vt Joonis 19) ning BS01 ja mõõtmiste standardhälvete erinevus 0.33 PSU on kõige suurem, võrreldes teiste mudelitega. HBM mudelid peegeldavad hästi mõõtmiste tendentsi, näiteks aastal 2013 veebruarist kuni detsembrini on see kõige paremini jälgitav.



Joonis 19. FerryBox **Finn Maid** soolsuse aegread.

Suurim korrelatsioon on HIROMB-EST mudelis (r on ligikaudu 76%), BS01 mudelil on 49% ja ülejäänutel on ligikaudu 71.5%. Antud juhul HBM mudelitel on kõige parimad näitajad.

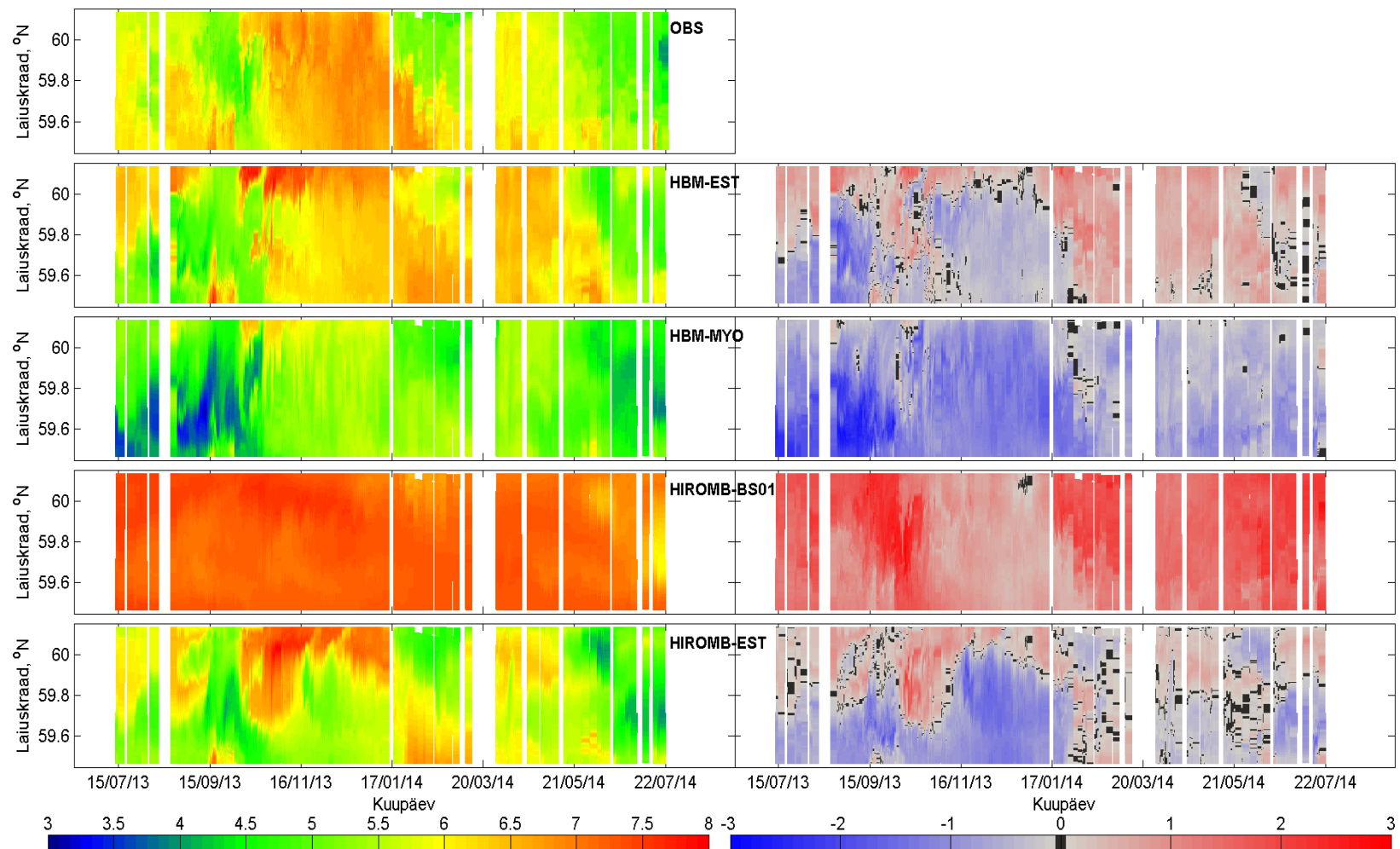
3.3.2. Soolsus Silja Europa trajektoiril

FerryBox Silja Europa soolsuste kaartidel on esitatud omavahel nähtavalt erinevad soolsuste ajalis-ruumilised jaotused (vt Joonis 20).

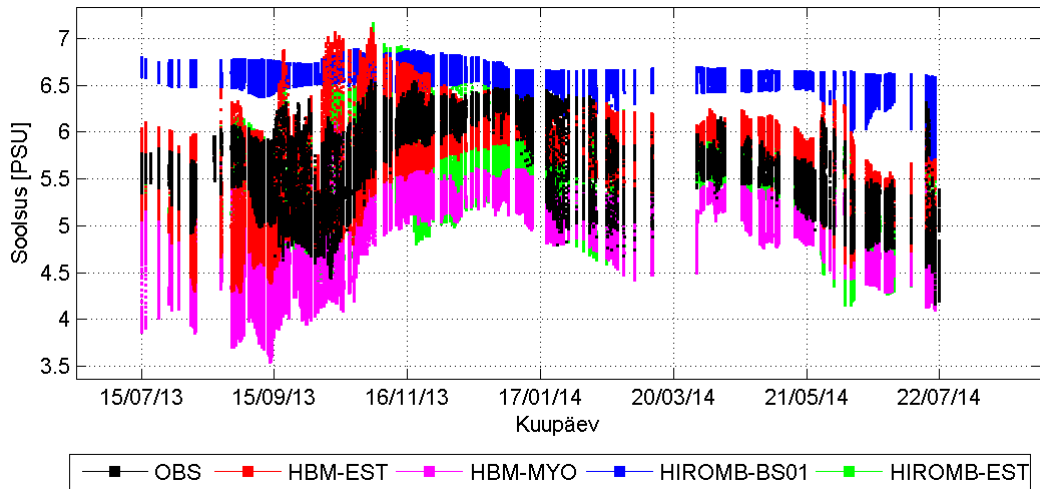
Oktoobrist 2013 kuni veebruarini 2014 on mõõtmiste väärtused kõrged (üle 6.5 PSU) ja üldjuhul soolsus ei lange alla 4 PSU. Kõige paremini jälgivad sesoonseid muutusi EST mudelid, kuid on näha, et oktoobris-novembris on soolsus ülehinnatud 1-2 PSU võrra. MyO mudel alahindab märgatavalt soolsust kogu perioodi jooksul, aasta 2013 septembris langeb modelleeritud soolsus lausa alla 4 PSU. HIROMB-BS01 mudeli tulemus on vastupidine, kogu perioodi ulatuses hindab mudel soolsust oluliselt üle ja soolsuse muutused on väga väiksed.

Erinevuste kaartidest (vt Joonis 20, parempoolne osa) on selgelt näha, et HBM-MyO alahindab nähtavalt mõõtmisi ja BS01 ülehindab soolsust, aasta 2013 oktoobrini on viimase väärtused kõige kõrgemad. EST mudelitel on omavahel sarnased hälbed, mõlemad mudelid prognoosivad tegelikust madalama soolsuse antud ajaperioodi algusel. Oluline erinevus MyO, BS01 ja EST mudelite vahel seisneb selles, et soolsuse ruumiline gradient Tallinn-Helsinki joonel on EST mudelites olemas (kuigi alahinnatud) ja soolsuse muustrid jälgivad kvalitatiivselt mõõtmisi. Väiksema resolutsiooniga mudelite tulemustes see paraku nii ei ole.

Aegridade joonis näitab, et BS01 mudeli väärtused muutuvad vahemikus 6-7 PSU, samal ajal ülejäänute mudelite ja ka mõõtmiste standardhälbed on oluliselt suuremad ($\sigma > 0.44$) ja väärtused väiksemad (vt Joonis 21). MyO mudel alahindab soolsuse kogu perioodi jooksul, aga soolsuse järsud tõusud ja langused on mingil määral kajastatud. Suurim korrelatsioon on HBM-EST ja MyO mudelites (vastavalt 61 ja 62%). Antud juhul HBM mudelitel on kõige paremad näitajad.



Joonis 20. FerryBox Silja Europa soolsus PSU (vasakul) ja soolsuse erinevused OBS (paremal). Erinevused on arvatud kui mudel – vaatlus.



Joonis 21. FerryBox Silja Europa soolsuse aegread.

3.3.3. Soolsus Romantika2 trajektoril

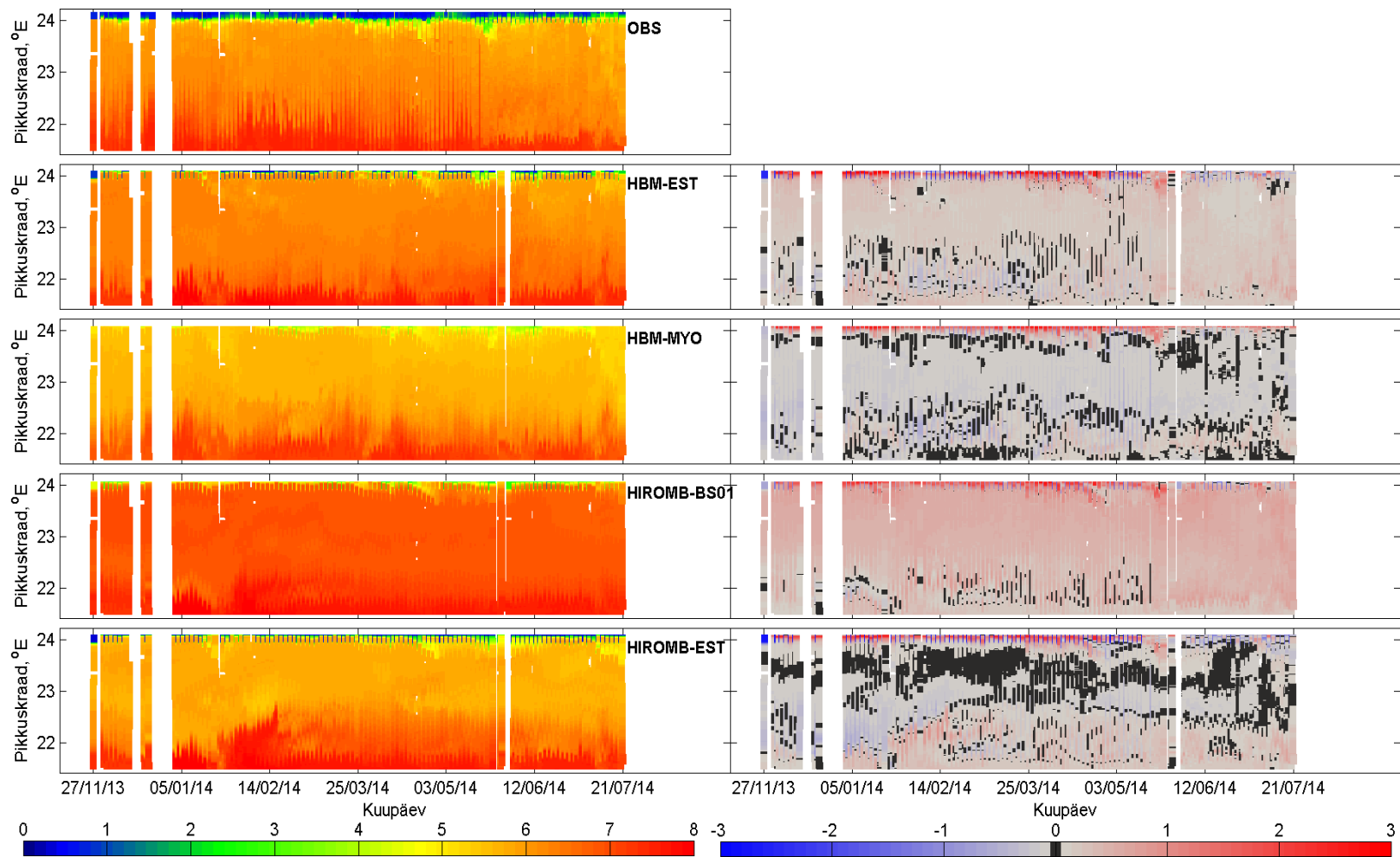
FerryBox Romantika2 abil mõõdetud soolsus ja mudelite prognoosid on esitatud jJoonis 22.

Jooniselt on näha, et pikkuskraadil 24 °E mõõtmised lähenevad nullile ja see on kajastatud kõige paremini EST mudelite tulemustes.

Maksimaalne mõõtmiste väärtus 6.91 PSU on kuupäeval 08.01.2014. Samal päeval modelleeritud soolsus on 6.87 PSU MyO mudeli korral, 7.28-7.30 PSU teiste mudelite korral. Minimaalse mõõdetud soolsuseid antud juhul ei vaadelda, kuna Daugava jõe suudmes mõõdetud nullile lähedane väärtus jookseb läbi kogu antud laeva mõõtmiste ajaperioodi.

Erinevuste kaardid näitavad, et kõige täpsem on HIROMB-EST mudel, sest kogu perioodi jooksul on suur arv kokkulangevusi mõõtmistega. HBM-EST ja BS01 mudelite abil leitud soolsus on kergelt ülehinnatud (vähem, kui 1 PSU võrra).

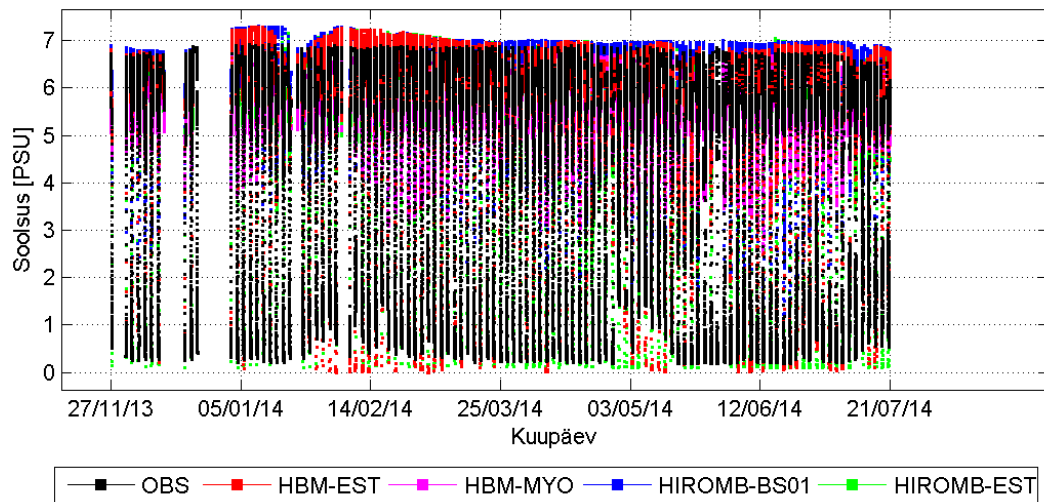
Aegread näitavad, et soolsuse ruumiline gradient on küllaltki suur olles vahemikus 0-7 PSU (vt Joonis 23). Soolsuse ülemine piir on mudelite HBM-EST ja HIROMB-BS01 abil prognoositud hästi, kuid nende standardhälbed (vastavalt $\sigma = 0.55$ PSU ja $\sigma = 0.48$ PSU) on palju väiksemad, kui mõõtmistel (σ on ligikaudu 0.91 PSU).



Joonis II.10. FerryBox Romantika2 soolsus PSU.

Joonis III.4. FerryBox Romantika2 soolsuse erinevused.

Joonis 22. FerryBox Romantika2 soolsus PSU (vasakul) ja soolsuse erinevused OBS (paremal). Erinevused on arvatatud kui mudel – vaatlus.



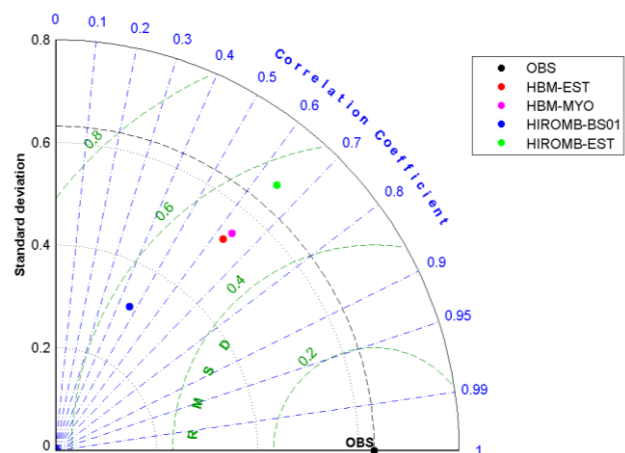
Joonis 23. FerryBox **Romantika2** soolsuse aegread.

Erinevuste kaartidest selgub, et MyO ja HIROMB-EST korreleeruvad mõõtmistega paremini, kui teised mudelid.

3.3.4. Soolsused kõikide FerryBox-ide trajektooridel

Kokkuvõtlik Taylori diagramm (vt Joonis 24) näitab, et mudelite korrelatsioon mõõtmistega on pigem kehva.

HBM mudelite tulemus on omavahel sarnane, mõlemad korrelatsioonid on vahemikus 63-64% ja standardhälve on vahemikus 0.53-0.55 PSU. Soolsuse modelleerimine HIROMB-BS01 mudeliga andis kõige ebatäpsema tulemuse, nimelt korrelatsioon on ainult 47%, ruutkeskmine erinevus on 0.55 PSU, mis on kõige kehvem võrreldes teiste mudelitega. HIROMB-EST oli kõige täpsem, kui arvestada standardhälvet $\sigma = 0.68$ PSU (mõõtmiste puhul $\sigma = 0.63$ PSU).



Joonis 24. Kõikide FerryBox soolsuste Taylori diagramm.

4. ARUTELU

Käesolevas töös on uuritud nelja mudeli prognoosimisvõimet kolme parameetrite põhjal.

Meretaseme valideerimise tulemused näitasid, et mudelid hindavad tegelikku veetaset küllaltki täpselt ja käituvad sarnaselt uuritava ajaperioodi jooksul. Vastavalt ootustele on rahulikumal perioodil modelleeritud meretase üldjuhul täpsem.

Peterburis uuritava ajaperioodil esinenud maksimaalne merevee tase (vt Joonis 9) on prognoositud 11 päeva varem, kui ta tegelikkuses aset leidis ning HBM-MyO näitas seda sündmust tugevalt ülehinnatuna. Peterburi jaam asetseb Soome lahe idatipus, kus esineb suur Läänemerel domineerivalt puhuvate edelatuulte mõju veetasemele põhjustades suhteliselt suure amplituudiga maksimaalse veetaseme sündmusi. Selliste ekstreemsete tingimuste modelleerimine nõuab mudelitelt väga suurt täpsust, mistõttu mudelite hälbed seal piirkonnas on ka suuremad, kui muudes Läänemere idaosa piirkondades. Lisaks on puuduvad mudelites mudeli võrkude madala resolutsiooni tõttu Peterburi üleujutuste eest kaitsvad tammid. Kolmandaks ei ole lokaalne topograafia väga täpselt teada. Kõik need asjaolud kokku tingivad suuri erinevusi mudelite statistilistes näitajates (vt Joonis 10) selles jaamas.

Kõige väiksem keskmine hälve on HBM-MyO mudelil (vt Joonis 10). Keskmine hälve on tugevalt mõjutatud meretasemest mudeli avatud rajal, mida HBM-MyO mudelis on kunstlikult 10 cm vähendatud püüdes kompenseerida rajatingimuste arvutamiseks kasutatava NOAMOD mudeli ebatäpsuseid. Kuivõrd teistes mudelites sellist kompenseerimist tehtud ei ole, siis ongi HBM-MyO keskmine hälve kõikides jaamades ligikaudu 10 cm väiksem, kui ülejäänud mudelites. Erinevused keskmistatud ruutkeskmises hälbes võivad olla tingitud vee transpordi täpsusest Taani väinades ja ka tuulepinge erinevatest parametriseringutest. *RMSD* erinevused

erinevate mudelite vahel võivad olla põhjustatud ka erinevate meteoroloogiliste tuulte kasutamise mõjudega merepinnal (Lagemaa, Jandt ja Huess 2014).

HBM-MyO arvutusvõrgu horisontaalne lahutus on Taani väinade ümbruses 0.5 meremiili ja seetõttu Taani väinade topograafia ja transport on selles mudelis paremini kirjeldatud. Lisaks eelnevale, on MyO mudeli vertikaalne resolutsioon tunduvalt kõrgem, kui BS01 mudelis, tingides seega parema halokliini ja termokliini kirjeldamise, mis läbi täpsema vee tihedusjaotuse kirjelduse omab mõju ka veetasemele.

Uurides kvaliteetsete meretaseme andmete suhtelist hulka saab väita, et vaatamata sellele, et Sõru jaamal puudub rohkem, kui 75% andmetest, võib tulemusi nimetada usaldusväärseteks, kuna mudelite korrelatsioon mõõtmistega on piisavalt suur. Suursaare jaamal on mõõtmisi tehtud iga 3 tunni järel, mis tähendab, et kogu uuritav ajaperiood on andmetes kirjeldatud ja selle jaama andmed on ka usaldusväärsed.

Silja Europa soolsuse hindamine mudeliga BS01: aegreast (vt Joonis 21) on hästi näha, et BS01 mudel ülehindab soolsust väga tugevalt. Põhjuseks on see, et aasta 2013 alguses antud mudelis ei olnud arvestatud Neva jõe magevee sissevoolu Läänemerre. Lisaks sellele mõjutab pinnasoolsuse ebaõnnestunud prognoosi turbulentsed segunenud kihi ebatäpne kirjeldus, mis on üldlevinud probleem tänapäevastes mudelites.

Niisiis pinnasoolsuse modelleerimisel selgub, et magevee sissevoolu arvesse võtmine mudelites on väga oluline, mistõttu on pinnasoolsus HIROMB-BS01 mudelis vähemalt aastal 2013 väga kehvalt kirjeldatud. Töö tulemused näitasid, et Soome lahe pinnasoolsus on kõige paremini kirjeldatud HIROMB-EST mudelis.

Kokkuvõttes, HBM-MyO sobib paljudel juhtudel hästi meretaseme prognoosimiseks. HBM mudelid üldiselt on kõige täpsemad temperatuuri prognoosimisel ning HIROMB-EST mudel on suurepärane soolsuse modelleerimiseks.

KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli uurida, kuidas käituvad erinevad mudelid parameetrite hindamisel Läänemere idaosas. Uurimiseks oli valitud nelja mudeli ja kahte tüüpi mõõtmiste ja kolme parameetri kolmeaastase perioodi andmed.

Meretase, pinnatemperatuur ja soolsus on tähtsad parameetrid Läänemere mudelite valideerimisel, sest nad on head mudeli käitumise indikaatorid.

Käesolevas magistritöös on mõõtmistega võrreldud mudelite HBM ja HIROMB erinevaid seaded. Veetaseme andmetena on kasutatud meretaseme mõõtejaamadest pärinevaid mõõtmisi, pinnatemperatuur ja soolsus on võetud FerryBox mõõtmistest. Andmete töötlemiseks ja valideerimiseks on kasutatud tarkvara MATLAB.

Uuritavaid modelleeritud parameetreid on võrreldud mõõtmistega mitmel viisil, näiteks on analüüsitud uuritava perioodi maksimaalset ja minimaalset meretaset. Temperatuuri ja soolsuse jaoks on koostatud kaardid, kust on nähtavad parameetrite muutused ja mis kuupäeval ning millistel laiuskraadidel (pikkuskraadidel) mõõtmised on teostatud.

Kõikide parameetrite jaoks on arvutatud sellised statistikud, nagu keskmine ja keskmistatud ruutkeskmine hälve, standardhälve ja korrelatsioon. Statistikuks kasutati Taylori diagrammi koostamisel iga mõõtmisandmete allika korral (so iga mõõtejaama ja iga laeva korral, arvestades parameetreid eraldi; kokku 32 mõõtmisandmete allikat), kui ka iga parameetri korral.

Meretaseme andmete võrdlemisel selgus, et mudelid korreleeruvad üldjuhul mõõtmistega hästi ja käituvad sarnaselt kogu perioodi jooksul. Aegriidide analüüs näitas, et üldiselt mudelid ülehindavad nii maksimaalset, kui ka minimaalset meretaset. Mudeli HBM-MyO meretaseme prognoosid on kõige täpsemad: keskmine

ja ruutkeskmine hälve on madalamad ja korrelatsioon kõige kõrgem, võrreldes teiste mudelitega. Seda kinnitasid ka Taylori diagrammid.

Pinnatemperatuuride kaartidelt on hästi näha, et talvel toimub vee pinnakihi külmenemine ja suvel soojenemine. Temperatuuri modelleerimisel kõik mudelid järgivad vaatlusi, kuid ülehindavad temperatuuri suvistel perioodidel ja alahindavad talvistel perioodidel. Kõikide mudelite statistilised näitajad on väga kõrged, HBM mudelid korreleeruvad aga kõige paremini mõõtmistega.

Pinnasoolsuse prognoosimisel on mudelites rohkem ebatäpsusi, kuigi prognoosid olid kvalitatiivselt vaatlustega sarnased. HIROMB-BS01 vastupidiselt HBM-MyO alahindab oluliselt soolsust. Kõige paremini jälgivad sesoonseid muutusi EST mudelid, st nendel on suurim korrelatsioon mõõtmistega. HIROMB-EST on kõige täpsem, kui arvestada standardhälvet.

Kokkuvõttes, HBM-MyO mudel prognoosib keskmiselt kõige täpsemini meretaset, kuid eraldi jaamade analüüs näitas, et ta paljudel juhtudel veidi ülehindab nii maksimaalset, kui ka minimaalset veetaset. Lähtudes üldisest Taylori diagrammist ja analüüsitud andmetest, HBM mudelid olid kõige täpsemad temperatuuri prognoosimisel. Soolsuse modelleerimisel on HIROMB-EST mudelis suurim arv kokkulangevusi mõõtmistega.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Berg, P. (2012). *Mixing in HBM*. DMI Scientific Report No. 12-03. Copenhagen, 21 pp. (Available at: www.dmi.dk/fileadmin/Rapporter/SR/sr12-03.pdf).
- Berg, P., and Weismann Poulsen, J. (2012). Implementation details for HBM. *Technical Report 12-11*. Ministry for Climate and Energy. Copenhagen: DMI.
- BSHC Working Group. (2007). *Report for the Harmonization of the Chart Datum of the Baltic Sea (CDWG)*. June 12–14, Klaipeda, Lithuania. 1–7.
- Canuto, V. M., Howard, A., Cheng, Y., and Dubovikov, M. S. (2002). Ocean turbulence. Part II: Vertical diffusivities of momentum, heat, salt, mass, and passive scalars. *Journal of Physical Oceanography*. 32, 240–264.
- Dick, S., Kleine, E., and Janssen, F. (2008). *First Results of a New Operational Circulation Model for the North Sea and the Baltic Using General Vertical Coordinates*. Proceedings of Euro-GOOS Conference, Exeter.
- Dick, S., Kleine, E., Müller-Navarra, S. H., Klein, H., and Komo, H. (2001). *The Operational Circulation Model of BSH (BSHcmod) – Model description and validation*. Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie 29, 49.
- Elken, J., Kõuts, T., Lagemaa, P., Lips, U., Raudsepp, U., and Väli, G. (2008). *Sub-regional observing and forecast system for the NE Baltic: Needs and first results*. In US/EU-Baltic International Symposium, 2008 IEEE/OES: US/EU-Baltic Symposium “Ocean Observations, Ecosystem-Based Management & Forecasting”, Tallinn, 27–29 May, 2008. IEEE Conference Proceedings, 1–9.
- Elken, J., Kõuts, T., Raudsepp, U., Laanemets, J., and Lagemaa, P. (2006). *BOOS/HIROMB-based marine forecasts in Estonia: problems, experiences and challenges*. In Proceedings of US/EU-Baltic International Symposium, May 23–25, Klaipeda, Lithuania. 1–22.
- Funkquist, L., and Kleine, E. (2007). *An introduction to HIROMB, an operational baroclinic model for the Baltic Sea*. Sweden: SMHI.
- Gästgifvars, M., Müller-Navarra, S. H., Funkquist, L., and Huess, V. (2008). *Performance of operational systems with respect to water level forecasts in the Gulf of Finland*. *Ocean Dynamics*, 58, 139–153.
- Hansen, W. (1956). *Theorie zur Errechnung des Wasserstandes und der Strömungen in Randmeeren nebst Anwendungen*. *Tellus*, 8, 287–300.

- Helmert, F. R. (1901). *Bericht über die relativen Messungen der Schwerkraft mit Pendelapparaten*. Berlin. Beilage B IX. p. 139–385.
- Kleine, E. (1994). *Das Operationelle Modell des BSH für Nordsee und Ostsee. Konzeption und Übersicht, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie* (manuscript report).
- Lagemaa, P. (2012). *Operational forecasting in Estonian marine waters*. Tallinn Univ. Technol. TUT Press.
- Lagemaa, P., Elken, J., and Kõuts, T. (2011). Operational sea level forecasting in Estonia. *Estonian Journal of Engineering*, 301–331.
- Lagemaa, P., Huess, V., and Jandt, S. (2014). *QUALITY INFORMATION DOCUMENT For Baltic Sea Physical Analysis and Forecasting Product*.
- Myrberg, K., Ryabchenko, V., Isaev, A., Vankevich, R., Andrejev, O., Bendtsen, J., Erichsen, A., Funkquist, L., Inkala, A., Neelov, I., Rasmus, K., Rodriguez Medina, M., Raudsepp, U., Passenko, J., Söderkvist, J., Sokolov, A., Kuosa, H., Anderson, T. R., Lehmann, A., and Skogen, M. D. (2010). Validation of three-dimensional hydrodynamic models of the Gulf of Finland. *Boreal Environment Research*, 15, 453–479.
- Parker, J. A., Kenyon, R., Troxel, D. (1983). Comparison of Interpolating Methods for Image Resampling. *IEEE Transactions on medical imaging*, vol. MI-2, no. 1.
- Peeck, H. H., Proctor, R., and Brockmann, C. (1982). Operational storm surge models for the North Sea. *Continental Shelf Research*, 2(4), 317–329.
- Petersen, W., Petschatnikov, M., Schroeder, F., Colijn, F. (2003). FerryBox systems for monitoring coastal waters. *Elsevier Oceanography Series*, vol. 69, 325–333, Germany: GKSS Research Centre, Institute for Coastal Research.
- Smagorinsky, J., (1963). General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review*, 91, 99–164
- Suursaar, Ü., Kullas, T., Otsmann, M. (2002). A model study of the sea level variations in the Gulf of Riga and the Väinameri Sea. *Continental Shelf Research*, vol 22, Issue 14, 2001–2019.
- Taylor, K. E. (2001). *Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram*. *J. Geophys. Res.*, 106, 7183–7192.
- The BAL MFC group. (2014). *MyOcean Baltic Sea Monitoring and Forecasting Centre*. EuroGOOS Conference. October 28–30. Lisbon.
- Uusitalo, S. (1960). *The numerical calculation of wind effect on sea level elevations*. *Tellus*, 12(4), 427–435.
- Vested, H. J., Nielsen, J. W., Jensen, H. R., Kristensen, K. B. (1995). *Skill Assessment of an Operational Hydrodynamic Forecast System for the North Sea and Danish Belts*. *Coastal and Estuarine Studies*, vol.47, 373–396.

SUMMARY

The aim of this master's thesis was to investigate, how different operational models estimate parameters in the Eastern Baltic Sea. Four models, two types of measurements and the 3-year data of three parameters were selected for the research.

Sea level, sea surface temperature and salinity are important parameters when validating the Baltic sea models, as they are good indicators of model performance.

Different setups of HBM and HIROMB models are compared with measurements. The sea level data is received from the sea level mooring stations and the FerryBox'es are used to study sea surface temperature and salinity under investigation. Software MATLAB is used for data processing and validation.

The modelled parameters and measurements are compared in many ways, e.g. extreme sea levels that took place during studied period are analysed. Charts, which show changes of parameters and the date and coordinates (longitude or latitude) of measurements, are made for temperature and salinity.

Statistics, such as bias, RMSD, standard deviation and correlation, were calculated for each parameter. These were used for Taylor diagrams, which were made for each source of measurement data (i.e. for each mooring station and for each ship considering parameters separately; in total 32 sources of measurement data) as well as for each parameter.

The models show high correlation between measurements and modelled sea level. The analysis of time series showed that generally models overestimate both maximum and minimum sea levels. HBM-MyO model gives the best result: bias and RMSD are smaller and correlation is higher than same statistics for other models. Taylor diagrams verified this fact as well.

The sea surface temperature charts clearly show, that in the winter sea surface is cooler and in the summer it is warmer. All model forecasts for temperature are quite precise, but models tend to underestimate temperatures in the winter periods and overestimate them in the summer. All statistics are high enough, but HBM models correlations with measurements are the best.

The sea surface salinity predictions have more inaccuracies, but forecasts were qualitatively similar to measurements. HIROMB-BS01 model noticeably underestimates salinity and, conversely, HBM-MyO overestimates.

EST models are the best in forecasting seasonal changes having the highest correlation. HIROMB-EST model showed the best results considering standard deviation.

Taking all into account, HBM-MyO model sea level predictions on average are the most precise, although the analysis of each mooring station showed, that in most cases model slightly overestimates both maximum and minimum sea levels. Reasoning from overall Taylor diagrams and examined data, HBM models are the most precise in temperature forecasting. HIROMB-EST model has the greatest number of same salinity values as measurements have.