

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Loodusteaduskond

Meresüsteemide Instituut

**VEETASEME VÕRDLEMINE ALTIMEETRI JA
PROGNOOSIMUDELI ANDMETE VAHEL
LÄÄNEMERE NÄITEL**
Bakalaureusetöö

Kati Miller

Juhendaja: Sander Rikka, nooremteadur

Tallinn

2017

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 arvametele jmt viidanud.

*Kati Miller
(allkiri ja kuupäev)*

Juhendaja: Sander Rikka
Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.
(allkiri ja kuupäev)

Kaitsmiskomisjoni esimees:
Lubatud kaitsmisele.

.....
(nimi, allkiri, kuupäev)

LÜHIKOKKUVÕTE

Merevee tase on mõjutab otseselt või kaudselt paljusid inimesi, seega on selle mõõtmine tähtis. Meretaseme mõõtmiseks kaugseires kasutatakse altimeetrit. Samuti kasutatakse tänapäeval veetaseme prognoosimiseks mudeleid. Mudelid annavad küll terviklikuma pildi kui seiremõõtmised, ent täielikult mudelid seireandmeid siiski asendada ei suuda. Selle töö eesmärk on võrrelda prognoosimudeli veetaseme andmeid satelliit-altimeetri andmetega Läänemere näitel ning anda ülevaade põhilistest veetaseme mõjutavatest teguritest ja altimeetri tööpõhimõttest. Võrreldi kolme perioodi veetaseme andmeid: detsembri ja jaanuari päeva keskmised, juuli ja augusti päeva keskmised ning juuli ja augusti tunni keskmised. Töös kasutati *haversine*'i valemit minimaalse distantsi leidmiseks satelliit-altimeetri ja mudeli punktide vahel ning viidi läbi statistiline analüüs. Tulemused näitavad selget erinevust altimeetri ja prognoosimudeli andmete vahel. Valdavalt on mudeli meretaseme prognoos kõrgem kui altimeetri andmetest leitud meretaseme anomaalia. Kõige paremini langesid altimeetri ja mudeli andmed kokku juuli ja augusti päeva keskmiste andmete korral, kuid parimas omavahelises korrelatsioonis olid juuli ja augusti tunni keskmiste andmed. Erinevus altimeetri ja mudeli andmete vahel võib tulla sellest, et altimeetri andmetes võib esineda n-õ saastavaid mõjureid, sest rannikuvetes esineb maapinna mõju radariantenni suures katvuses. Detsembri ja jaanuari andmete erinevus võib tuleneda talvistest jääoludest. Juuli ja augusti tunni andmete ebatäpsus võib tuleneda väiksest andmehulgast.

Märksõnad: meretaseme kõrgus, altimeeter, prognoosimudel

ABSTRACT

Sea level comparison between altimeter data and forecast model data in the Baltic Sea

Sea level height influences many people directly or indirectly, therefore measuring sea level is important. In remote sensing altimeter is used for sea level monitoring. Nowadays models are often used for forecasting sea level. Although, models provide more complete picture than monitoring measurements, they cannot fully replace monitoring data. Purpose of this thesis is to compare sea level between forecast model data and satellite-altimeter data in the Baltic Sea and to give an overview of the main factors affecting sea level and operation of altimeter. Data was compared for three periods: December–January daily means, July–August daily means and July–August hourly means. *Haversine* formula was used for calculating the minimum distance between model and satellite-altimeter points and statistical analysis was carried out. Results show a clear difference between altimeter and model data. Forecast model sea level is mainly higher than altimeter sea level anomaly. Altimeter and model data matched best with July–August daily mean data, but correlation coefficient was highest with July–August hourly mean data. The difference can occur because altimeter cannot function well in shallow waters because of the land effect in the large antenna footprint. Ice conditions in the winter may cause slightly deteriorated results between model and altimeter data. Small data set may cause inaccuracy in July–August hourly mean data.

Keywords: sea level height, altimeter, forecast model

SISUKORD

LÜHIKOKKUVÕTE	3
ABSTRACT	4
SISSEJUHATUS	7
1. LÄÄNEMERE VEETASE.....	8
1.1 Ülevaade veetaseme mõõtmistest Läänemeres.....	8
1.2 Veetaseme jälgimine tänapäeval.....	9
1.3 Veetaseme muutlikkus Läänemeres.....	11
1.3.1 Läänemere veetaset mõjutavad tegurid	11
2. ALTIMEETER.....	14
2.3 Altimeetri ülevaade.....	14
2.2 Altimeetri tööpõhimõte.....	15
2.2.1 Distantis satelliidi ja mõõdetava maapinna vahel.....	16
2.2.2 Satelliidi kõrgus.....	16
2.2.3 Mõõdetava pinna kõrgus	18
3. METOODIKA JA ANDMED.....	20
3.1 Metoodika	20
3.1.1 Punktide leidmine	20
3.1.2 Statistikud	21
3.2 Andmed.....	22
3.2.1 Altimeetri andmed	22
3.2.2 Mudeli andmed.....	23
4. TULEMUSED JA ANALÜÜS	24

4.1	Tulemused.....	24
4.2	Statistikud	26
4.3	Järeldused.....	28
5.	KOKKUVÕTE.....	30
	Tänuavaldused.....	31
6.	KASUTATUD KIRJANDUS	32

SISSEJUHATUS

Veetase on üks olulisemaid parameetreid merekeskkonna seires. Veetaset hakati mõõtma Läänemerel juba 18. sajandil. Kaugseire veetaseme mõõtmise instrument on satelliit-altimeeter, mis teeb kindlaks kauguse satelliidist kuni võrdluspinnani, mõõtes satelliidilt pinnani peegeldunud radari impulssi ja selleks kulunud aega (Fu jt 2001). Tänapäeval kasutatakse veetaseme prognoosimiseks üha rohkem mudeleid. Mudelite eeliseks on see, et saadakse tervikpilt mõõdetavast keskkonnast, samal ajal kui seire käigus saadavad andmed on ajaliselt ning ruumiliselt piiratud. Praegu annavad mudelid siiski võimaliku veetaseme muutumise suuna ega suuda veel täielikult asendada seire käigus saadud vaatlusandmeid.

Töö eesmärk on uurida Läänemere veetaseme muutlikkust ja selle mõõtmisi ning võrrelda prognoosimudeli veetaseme andmeid altimeetri andmetega. Uurimiseks kasutatakse Copernicuse Merekeskkonna seireteenuse altimeetri ning prognoosimudeli andmeid.

Tööga selgitatakse välja, kui suur on erinevus prognoosimudeli veetaseme andmete ning altimeetri andmete vahel. Selgitatakse, millise perioodi ajal langevad altimeetri ja mudeli andmed kõige paremini kokku ning analüüsitakse andmete erinevuse põhjuseid. Erinevuse paremaks mõistmiseks analüüsitakse ka statistikuid.

Lisaeesmärk on tutvuda kontakt- ja altimeetrimõõtmise ajaloolise poolega ning vaadelda veetaset mõjutavaid tegureid.

Töö koosneb neljast peatükist. Esimene peatükk käsitleb ülevaadet veetaseme mõõtmistest Läänemeres ning veetaseme muutlikkust ja tegureid. Teises peatükis vaadeldakse lähemalt altimeetrit ja selle tööpõhimõtet. Kolmas peatükk kirjeldab töös kasutatud meetodeid ja andmeid. Neljas peatükk käsitleb saadud tulemusi, järeldusi ning ettepanekuid.

1. LÄÄNEMERE VEETASE

Läänemeri on osaliselt suletud meri, mille veetase on mõjutatud Põhja-Atlandilt saabuvatest tsüklonitest ja värske vee sissevoolust ümbritsevatelt maa-aladelt. Uuritavat piirkonda mõjutab ka maapinna vertikaalne liikumine, mis on reaktsioon jää alt vabanemisele (Hünicke 2008). Meretaseme muutus on üks kõige otsesem kliimamuutuse tagajärg. Seega on suurenenud teadlikkus vajadusest piirkondlike andmete ning meretaseme trendide prognooside järele (Stramska jt 2013).

1.1 Ülevaade veetaseme mõõtmistest Läänemeres

Läänemeres on pikk ja usaldusväärne meretaseme aegrida, mis on saadud nii meretaseme skaaladelt kui ka mareograafidelt (veetaseme mõõtmiseks kasutatav instrument). Paljud aegread pärinevad 1800. aastatest ja üks isegi 1700. aastate lõpust. Kui ajas veelgi tagasi minna, saab kividele tehtud lõigete kaudu näidata keskmist meretaset mingil kindlal ajal. Keskmise meretaseme märkimiseks tehtud lõigete tegemisega alustati 1731. aastal Botnia lahe edelaosas. Need on kasulikud selleks, et mõista jääajajärgset maakerget (Ekman 2009).

Meretaseme skaalat kasutati 1746. aastal Härnösandis, võimaldades teha esimesi järeldusi meteoroloogiliste efektide mõjust meretasemele. Püsivam meretaseme skaala võeti praktilisel eesmärgil kasutusele 1700. aastatel kolmes rannikuäärses pealinnas: Stockholmis, Kopenhaagenis ja Kroonlinnas Venemaal. Ainult Stockholmi meretaseme skaala andmed on arhiveeritud ja piisavalt usaldusväärsed. Andmearhiiv algab 1774. aastast ning suur osa sellest on säilinud. See teeb Stockholmi meretaseme andmete aegrea üheks pikemaks maailmas (Ekman 2009).

Suuremas mastaabis sai süstemaatiline meretaseme mõõtmine alguse 1811. aastal Saksamaal sadamates, mis asusid jõesuudmetes. Mõned usaldusväärsed meretaseme andmed on säilinud tänaseni. Sarnast mõõtmist hakati tegema ka majakates ja lootsijaamades Rootsis ja Soomes 1849. aastal. Suurem osa neist andmetest on säilinud, kuid vähest peetakse usaldusväärseks (Ekman 2009).

Teaduslikult kontrollitud mareograafe hakati enamikes Läänemere-äärsetes riikides kasutama 1890. aastal. Sellest ajast on palju säilinud ka usaldusväärseid andmeid. Mareograafi andmeid hoitakse tavaliselt riigi hüdrograafia instituutides või rahvusvahelises meretaseme instituudis Inglismaal (Ekman 2009).

1.2 Veetaseme jälgimine tänapäeval

Tänapäeval kasutatakse kontaktmõõtmiseks peamiselt hoovusemõõtjaid ja fikseeritud mõõtmisplatvorme. Hoovusemõõtja ehk mareograaf on instrument, millega mõõdetakse veetaseme muutust nullpunkti suhtes (Shennan jt 2015). Fikseeritud platvormidega mõõdetakse paljusid erinevaid parameetreid, näiteks temperatuuri, hoovusi, lainetust, hapnikusisaldust ja veetaset (Prouzet 2016).

BOOS (*Baltic Operational Oceanographic System*) loodi 2001. aastal eesmärgiga töötada välja ja edendada toimiv okeanograafiline infrastruktuur Läänemerele. Selle raames kogutakse, tõlgendatakse ja esitatakse regulaarselt *in situ* ehk kontaktmõõtmise ning satelliidi andmeid (Baltic Operational ...).

Joonisel 1 on kujutatud BOOS süsteemi kuuluvaid Läänemere mõõtmisjaamu, mis mõõdavad veetaset. Rohelise ja punasega on kujutatud hoovusemõõtjad, kollasega aga fikseeritud platvorme (Baltic Operational ...).

Lisaks kontaktmõõtmistele kasutatakse meretaseme jälgimiseks tänapäeval ka altimeetrit ja prognoosimudeleid.



Joonis 1. BOOS süsteemi kuuluvad hoovusemõõtjad ja fikseeritud platvormid. Rohelise ja punase värviga on kujutatud hoovusemõõtjaid, kollase värviga fikseeritud mõõteplatvorme. (Baltic Operational ...)

1.3 Veetaseme muutlikkus Läänemeres

Meretaseme muutlikkust mõjutavad meteoroloogilised, astronoomilised ja hüdrooloogilised elemendid. Selleks, et saada teada meretaset, kasutatakse teoreetilist keskmist merepinna kõrgust, mis kujutab endast prognoosi tegelikust keskmisest merepinnast ning kindlustab võrdlustasandi, et võrrelda merepinna erinevates sektiioonides ja ajas. Võrreldes mõõdetud meretaset teoreetilise keskmise merepinna tasemega, saab teada, kas tegelik meretase on kõrge või madal (Leppäranta jt 2009).

1.3.1 Läänemere veetaset mõjutavad tegurid

Läänemere veetaseme peamine mõjur on tuul, mis mõjutab keskmist meretaseme muutlikkust mitmeaastastel perioodidel ja dekaadidel (Hünicke 2008). Samuti põhjustavad tuule ja õhurõhu muutus veetaseme muutusi üheks päevaks kuni mõneks nädalaks. Tuule mõju avaldub vee kuhjamisena, mis avaldub eriti lahtede lõpus (Leppäranta jt 2009; Alari jt 2012).

Baromeetiline efekt põhjustab samuti meretaseme muutust. Baromeetiline efekt tuleneb Läänemere ja Põhja-Atlandi regioonides olevast õhurõhu erinevusest (Hünicke 2008). Õhurõhu muutusele ühe millibaari võrra vastab veetaseme tõus üks sentimeeter (baromeetri efekt). Seega põhjustab õhurõhu muutus veetaseme muutust umbes ± 50 cm (Leppäranta jt 2009).

Läänemere veetaseme üks mõjutajatest on jääajajärgne tagasipõrge ehk maakerge, mis on pidev maakoore tõus ning toimub jääkatte alt vabanemise tõttu. Pikaajalised meretaseme vaatlused enamikus Läänemere piirkonna jaamades näitavad maakoore tõusu määra (Ekman 2009). Maapinna vertikaalne liikumine on Läänemere põhjaosas hinnanguliselt umbes 10 mm aastas, Läänemere keskosas umbes 5 mm ja Läänemere lõunaosas umbes -1 mm (Stramska jt 2013).

Kliimaatiline ehk globaalne ehk eustaatile meretaseme tõus on pidev meretaseme tõus globaalse merepinna tõusu tõttu ning on nähtav ka Läänemeres. Eustaatile meretaseme tõus toimub liustike sulamise ja merevee soojuspaisumise tõttu (Ekman 2009). Läänemeres domineerib eelmainitud veetaseme tõus lõunaosas, kus maakerge on väga väike (Leppäranta jt 2009). Kasutades pikaajalisi vaatlusandmeid, saab hinnata eustaatilise meretaseme tõusu efekte ja muutusi. See on oluline ka globaalse soojenemise mõjude mõistmiseks (Ekman 2009).

Talvist meretaseme muutust põhjustab hooajaline kliima kõikumine ja merejää, mille mõju veetasemele saab hinnata pikaajaliste vaatlusandmete järgi (Ekman 2009). Talvel on osa Läänemere pinnast kaetud jääga, eriti Botnia laht ja Soome laht. Läänemere lõunaosa on harva kaetud jääga (Hünicke 2008).

Looded põhjustavad väikseid perioodilisi muutusi meretasemes polaarse liikumise tõttu. Polaarne liikumine on ringliikumine pooluse suhtes. Läänemeres on see efekt suurem, kui ennustatud. Põhjus on selles, et tuule muutused leiavad aset samal perioodil kui looded (Ekman 2009). Looded Läänemeres on enamasti ööpäevased ja amplituudiga 0,5–2 cm (Leppäranta jt 2009).

Olulisi muutusi mitmeaastases meretasemes tekitab NAO ehk Põhja Atlandi ostsillatsioon. NAO mõjutab meretaset enim mitmeaastastel perioodidel ja vahemikus detsembrist maini. Positiivne NAO-indeks toob kaasa tugevaid läänetuuli ja seetõttu suureneb vee transport Põhjamerest Läänemeresse (Leppäranta jt 2009). Statistiline seos NAO ja Läänemere veetaseme vahel on regionaalne ja heterogeenne. Näiteks võib korrelatsioonikordaja NAO-indeksi ja meretaseme vahel tõusta Botnia lahes 0,8-ni viimastel dekaadidel, kuid Läänemere lõunaosas jääb korrelatsioon 0,3 juurde (Hünicke 2008).

Temperatuur mõjutab veetaset vahetult soojuspaisumise tõttu veesambas. Hooajaline jahenemine ja soojenemine põhjustab merepinna varieeruvust hinnanguliselt amplituudiga kaks sentimeetrit (Hünicke 2008).

Keskmine pinna soolsus näitab gradienti alates umbes 20 psu-st Kattegati regioonis ning vähenedes ligi 5 psu-ni Botnia lahes. See on peamiselt tingitud jõgede mageda vee sissevoolust. Merepinna kõrguse erinevus Botnia lahe siseosas ja Skagerrakis on suurusjärgus 35–40 cm. See on osaliselt tingitud soolsuse gradiendist ja osaliselt läänetuultest (Hünicke 2008).

Merevee tiheduse muutus põhjustab väikest veetaseme muutust mitmeks kuuks. Kui näiteks veetihedus muutub 1 kg/m^3 , siis muutub veetase 5 cm. Püsiv horisontaalne veetiheduse erinevus veidi vähem kui 10 kg/m^3 Läänemere põhja- ja lõunaosa vahel väljendub selles, et põhjaosas on kõrgem veetase kui lõunaosas. Keskmiselt langeb veetase 35–40 cm Botnia lahest Skagerrakini (Leppäranta jt 2009).

Veetaset võib mõjutada ka inimtegevus, mis ei ole seotud globaalse soojenemisega. Näiteks jõgede äravoolu reguleerimine tammidega ja muud mereäärsed ehitised võivad mõjutada kohalikku meretaseme mõõtmist (Hünicke 2008).

Eelmainitud tegurid võivad teatud tingimustes koos mõjutada Läänemere veetaset suurusjärgus –1 meetrist kuni 1,5 meetrini. (Wolski jt 2014)

2. ALTIMEETER

2.3 Altimeetri ülevaade

Esimese baromeetrilise altimeetri leiutas ameeriklane Paul Kollsman 1928. aastal. See altimeeter on tuntud ka kui Kollsmani „aken”, mis muudab õhurõhu distantsiks üle merepinna. Altimeeter andis pilootidele andmeid õhusõiduki kõrguse kohta maapinnast ning see võimaldas lennata halva nähtavusega. 1938. aastal demonstreeris Bell Labs esmakordselt FM raadioaltimeetrit. See mõõdab väljasaadetud raadiolainete tagasipeegeldumise aega kõrguse arvutamiseks mere- või maapinnast (Bellis 2016).

1969. aastal arutati Williamstownis Williamsi kolledži kongressil võimalusi kasutada satelliit-altimeetrit geodeesia missioonide jaoks, et määrata Maa kuju (Shay 2010).

Ameerika Ühendriigid võtsid esimesena missioonidel kasutusele satelliidil oleva altimeetri Skylab ja Geos3. 1978. aastal kasutati altimeetrit Seasat satelliidil ja 1985. aastal Geosat satelliidil — need olid esimesed altimeetrid, mis andsid kasutatavaid andmeid. 1991. aastal käivitas ESA (*European Space Agency*) ERS-1 missiooni, kus kasutati satelliiti, mille pardal oli mitmeid instrumente, sealhulgas altimeeter (Altimetry History ...).

2.2 Altimeetri tööpõhimõte

Satelliitaltimeeter teeb kindlaks kauguse satelliidist kuni võrdluspinnani, mõõtes satelliidilt pinnani peegeldunud radari impulssi ja selleks kulunud aega. Mõõdetava pinna kõrgus on erinevus orbiidil oleva satelliidi positsiooni vastavalt valitud viitepinna (Maa tsepter või umbkaudne Maa pind ehk referentsellipsoid) ja satelliitpinna vahemiku vahel. Peale merepinna kõrguse saab altimeetriga mõõta ka näiteks lainekõrgust ja tuule kiirust üle ookeani (Fu jt 2001).

Peamised instrumendid satelliitaltimeetri süsteemis on (Jason-2...):

- radaraltimeeter ja antenn, mis mõõdavad merepinna kõrgust;
- radiomeeter, mis mõõdab atmosfääri häireid;
- süsteem, mis määrab satelliidi täpse asukoha orbiidil.

Radiomeetrit kasutatakse radari signaalis esinevate häirete vähendamiseks. Veeaur, osakesed atmosfääris ning muud parameetrid võivad mõjutada signaali peegeldumise aega, moonutades mõõtmiste vahemikku. Nende häirete mõju radari signaalile saab parandada, kui mõõta neid radiomeetriga mitmel erineval sagedusel ning modelleerimise teel (Fu jt 2001).

Täpsete tulemuste saamiseks on satelliitidele lisatud ADCS süsteem (*Attitude Determination and Control System*), mis garanteerib väga täpse orbiidi ning seega mõne sentimeetrise mõõtetäpsuse. Orbiidi täpseks määramiseks ja kontrollimiseks kasutatakse satelliidi pardal mitut erinevat asukoha kindlakstegemise süsteemi, näiteks päikesesensor, tähesensor, GPS, reaktsiooniratas või käitursüsteem. Seega nõuab altimeetria suure hulga informatsiooni arvestamist enne, kui on võimalik andmeid kasutada. Andmetöötlus on suur osa altimeetriast, tootes erineva taseme andmeid eri kasutusvaldkondade jaoks (Fu jt 2001).

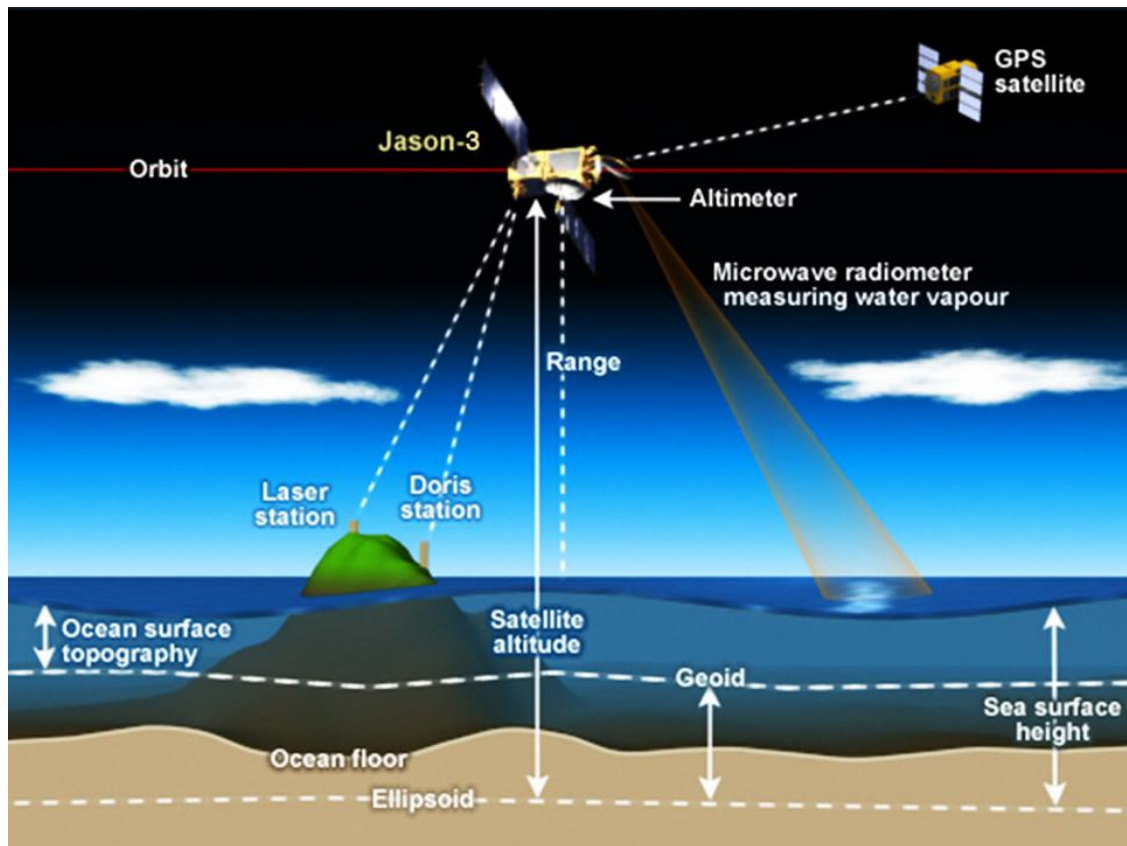
2.2.1 Distantis satelliidi ja mõõdetava maapinna vahel

Distantis satelliidi ja mõõdetava maapinna vahel nimetatakse vahemikuks tähisega R (*range*, vt joonis 2), mida tuvastatakse tagasituleva kaja aja viitega. Radaraltimeetrid, mis on satelliidi pardal, saavad kõrgel sagedusel (üle 1700 impulsi sekundis) signaale Maale ja saavad pinnalt tagasi kaja (nn laine kuju — altimeetri radari tagasituleva kaja ulatus ja kuju). Seda analüüsides on võimalik saada täpne aeg, mis kulub impulsi edasi-tagasi liikumiseks satelliidi ja pinna vahel. Aja mõõtmised korrastatakse valguse kiirusele (kiirus, millega elektromagnetilised lained liiguvad), andes vahemiku R mõõtmise (Fu jt 2001).

Kui elektromagnetlained liiguvad läbi atmosfääri, võib neid aeglustada veeaur, ionisatsioon ja muud tegurid. Pärast nende nähtuste korrigeerimist saab lõplikku vahemikku hinnata väga täpselt (Fu jt 2001).

2.2.2 Satelliidi kõrgus

Satelliidi altimeetri missioonide jaoks on kriitilised sellised orbitaalsed parameetrid nagu kõrgus, kalle ja periood. Satelliidi kõrguse mõõtmine sõltub mitmest takistusest, näiteks kaldest, atmosfääri takistusest, satelliidile mõjuvast gravitatsioonijõust ja kaardistamiseks määratud piirkonnast. Periood on aeg, mis kulub satelliidil selleks, et jõuda tagasi samasse pinna punkti, kust mõõtmist alustati, Maa pinnalt ühtlaselt mõõtmisi tehes. Kalle annab kõrgeima laiuskraadi, kust satelliit saab mõõta (Fu jt 2001).



Joonis 2. Altimeetri tööpõhimõte (Jason-2...)

Satelliidi kõrgus (vt joonis 2) on satelliidi kaugus vastavalt valitud osundi suhtes (nt referentsellipsoid). Satelliiti saab järgida mitmel viisil, et mõõta selle täpsem kõrgus ja seega määrata selle täpne orbiit Maa suhtes, täpsusega 1 või 2 sentimeetrit. Peamised meetodid on (Fu, Cazenave 2001):

- Doppleri nihe — määratakse täpselt kindlaks satelliidi kiirus orbiidil, et tuletada Maaga võrreldes satelliidi trajektoori;
- GPS või sarnased vahendid;
- laserandur, mida tihti kasutatakse kalibreerimiseks.

2.2.3 Mõõdetava pinna kõrgus

Füüsikaseaduste kohaselt on ookeani pind ekvipotentsiaalpinna Maa gravitatsiooniväljas (ignoreerides laineid, tuult, loodeid ja hoovuseid). Esimeses lähenduses loetakse Maa ekvipotentsiaalpinna sfääriliseks. Kuid Maa pöörlemise tõttu on parem Maa ekvipotentsiaalpinna lugeda ellipsoidiks, kus polaaridiameter on 43 kilomeetrit vähem kui ekvatoriaalne läbimõõt. Kuigi ellipsoid sobib Maa kuju jaoks väga hästi, siis tegelik ookeanipind erineb ideaalsest ellipsoidist kuni 100 meetrit. Muhud ja langused ookeanipinnal on põhjustatud hetkevariatsioonidest Maa gravitatsiooniväljas. Näiteks mõjub lisa gravitatsiooniline külgetõmme suure mäe tõttu ookeani põhjas, tõmmates vett enda poole ja tekitades nõ künka ookeani pinnale. Sellist kungast veepinnal palja silmaga ei näe, sest ookeanipinna kalle on väga madal (Sandwell jt 1997).

Pinna kõrgus (H) on satelliidi vahetu kaugus võrdluspinnast:

$$H' = H - \Delta h \quad (1)$$

kus H' on korrigeeritud ehk täpne pinna kõrgus ja Δh tähistab erinevaid parandeid (Fu jt 2001).

Merepinna kõrgus (SSH – *Sea Surface Height*, vt joonis 2) ühendab erinevaid mõjusid (Fu jt 2001):

- Merepinna kõrgus, mis eksisteeriks ilma igasuguste häirivate teguriteta (tuul, hoovused, looded jms). See pind, mida tuntakse geoidina, on määratud raskusjõu muutustest üle kogu maailma, mis on omakorda tingitud suurtest massi ja tiheduse erinevustest mere põhjas. Näiteks tihe kivimi tsoon merepõhjas võib deformeerida merepinna mitukümmend meetrit ja olla geoidil nähtav mäena.
- Ookeani ringlus või dünaamiline topograafia, mis hõlmab:
 - püsivat statsionaarset komponenti (püsiv ringlus on seotud Maa pöörlemisega, püsivad tuuled jne), mille keskmine mõju on umbes üks meeter;
 - varieeruvat komponenti (tuul, keerised, hooajaline kõikumine jne).

Et tuletada topograafilist dünaamikat ehk hälvet geodist, on kõige lihtsam lahutada geoidi kõrgus merepinna kõrgusest. Tegelikuses lahutatakse keskmine merepinna kõrgus, et saada muutuvat osa ehk keskmist merepinna anomaaliat (SLA ehk *Sea Level Anomaly*) ookeani signaalist. SLA on veetaseme kõrgus keskmise merepinna suhtes (Fu jt 2001).

3. METOODIKA JA ANDMED

3.1 Metoodika

3.1.1 Punktide leidmine

Satelliidi ja mudeli ühiste punktide leidmise protsess algab vastavate NetCDF failide avamisega. Altimeetri päeva keskmistest andmetest kasutatakse järgmisi parameetrid: pikkuskraad, laiuskraad, mõõtmise/piksli aeg ning satelliidi SLA. Samu parameetreid loetakse ka mudeli produktides (pikkuskraad, laiuskraad, aeg ja meretase).

Satelliidi ja mudeli punktide minimaalse distantse leidmiseks on kasutatud *haversine*'i valemit. Selle valemiga arvutatakse suurringi distantse kahe punkti vahel ehk väikseim vahemaa üle Maa pinna. Seega saab arvutada distantse punktide vahel linnulennult, ignoreerides pinnavorme (Veness 2011).

Haversine'i valem (Veness 2011):

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos\varphi_1 \times \cos\varphi_2 \times \sin^2\left(\frac{\Delta\lambda}{2}\right) \quad (2)$$

$$c = 2 \times \operatorname{atan}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}) \quad (3)$$

$$d = R \times c, \quad (4)$$

kus φ on laiuskraad, λ on pikkuskraad, R on Maa raadius ja d on distantse kahe punkti vahel.

Lisaks leitakse mudeli meretaseme punkti $P(i, j)$ lähimate punktide keskmine $P'(i-1:i+1, j-1:j+1)$, kuna satelliidi piksel on umbes poole suurem kui mudeli oma.

Ühiseid punkte on leitud pikkuskraadid vahemikus 13 °E kuni 31 °E ja laiuskraadid vahemikus 54 °N kuni 66 °N. Meetod on rakendatud MATLAB-i keskkonnas.

3.1.2 Statistikud

Mudeli ja satelliitaltimeetri andmete võrdluseks on kasutatud viite erinevat statistikut: *bias* ehk *Mean Error* (ME), Pearsoni korrelatsiooni koefitsient r , standardhälve, ruutkeskmine hälve (RMSE) ja statistiline olulisus p -väärtus.

Bias ehk keskmine hälve on leitud keskmise vaadeldud väärtuse ja tegeliku väärtuse vahel, kus altimeetri andmeid loetakse tegelikuks väärtuseks ja prognoosimudeli andmeid vaadeldud väärtuseks.

Standardhälve iseloomustab väärtuse hajuvust keskmise ümber. Standardhälve on leitud kolmele andmekogumile: satelliidile, mudelile ja mudeli keskmisele. Selleks on kasutatud Exceli STDEV funktsiooni, mis esitab valimi standardhälbe, võttes aluseks kogumi.

Ruutjuur keskmisest ruuthälbest ehk ruutkeskmine viga ehk RMSE on prognoositud väärtuste ja vaadeldud väärtuste vahelise erinevuse näitaja (Chai jt 2014).

RMSE arvutamiseks on kasutatud järgnevat valemit (Chai jt 2014):

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{\sum_{t=1}^n (At - Ft)^2}{n}\right)} \quad (5)$$

kus At on tegelik väärtus ehk altimeetri väärtus, Ft on mudeli prognoositud väärtus ja n on valimi suurus.

Statistiline olulisus ehk p -väärtus näitab, milline on tõenäosus, et mõõtmise tulemused on leitud juhuslikult. Selles töös kasutati statistilise olulisuse ehk p -väärtuse leidmiseks Exceli lisamooduli analüüsi tööpaketti. Kasutati regressiooni tööriista, kus üks sisendhulk oli satelliidi SLA ja teiseks mudeli mereprognoosi väärtused.

Statistikute leidmiseks on kasutatud programmi Microsoft Excel.

3.2 Andmed

Töös kasutatud andmed on saadud Copernicuse Merekeskkonna seireteenuse kodulehelt. Kasutatavad mudeli andmed on Läänemere füüsilise analüüsi ja prognoosimudeli keskmised päeva ja tunni andmed, altimeetri andmed on Euroopa ookeanide meretaseme anomaalia produkti andmed.

3.2.1 Altimeetri andmed

Töös kasutatavad meretaseme anomaalia andmed on loodud SL-TAC multimissiooni altimeetri andmetötlussüsteemi abil. SL-TAC süsteem töötleb kõiki andmeid järgmistelt altimeetritelt: HY-2A, Saral/AltiKa, Cryosat2, Jason-2, Jason-1, T / R, Envisage, GFO, ERS1/2. Teenus pakub järjepidevat ja ühtlast andmekataloogi erinevatele rakendustele nii reaajas kui ka reaalajaväliselt (Mertz jt 2016).

SL-TAC koosneb kahest komponendist: peaaegu reaajas (NRT ehk *near real time*) ja viivitatud ajas (REP ehk *reprocessed*) produkt. NRT puhul on süsteemi peamine eesmärk anda kõrge kvaliteediga altimeetri andmeid kõigilt saadavaolevatelt missioonidelt (Mertz jt 2016). Töös on kasutatud NRT produkti.

Selleks et viia andmed kasutatavale kujule, tuleb algandmetega viia läbi järgmised protsessid (Mertz jt 2016).

- Andmete kogumine — selle protsessi alla kuulub duplikaatandmete ignoreerimine, dateerimine, altimeetriandmete ja lisaandmete (nt rõhu parandused) ümberkujundamine ja sünkroniseerimine.
- Homogeniseerimine ehk andmete eeltöötlemine — rakendatakse uusimaid vajalikke korrektsioone, mudeleid, viiteid jne.
- Sisendandmete kvaliteedikontroll — protsessi tehakse selleks, et olla kindlad, et kasutatakse vaid täpsemaid altimeetri andmeid. Protsessi käigus redigeeritakse algandmeid, rakendatakse algoritme orbiidi vea vähendamiseks, arvutatakse ja kinnitatakse ristumisi.

- Toote genereerimine — see protsess jaguneb neljaks etapiks: töötlemata SLA arvutamine, ristumise kontroll, filtreerimine ja kõrvalproduktide generaliseerimine.
- Ühendamine – ühendatakse eri altimeetrite andmed ja genereeritakse SLA produkt.
- Lõplik kvaliteedikontroll — sisemistele andmetele ja produktidele tehakse lõplik kvaliteedikontroll. Selleks kasutatakse operaatorite automatiseeritud kontrolli ja hoiatusi, iga andmete töötlemise sammu statistika kohta koostatakse raporteid, mida vaatavad kaks korda nädalas üle ekspertid.

Meretaseme kõrgus arvutatakse 20 aasta keskmise suhtes. Kõigi altimeetrite missioonid on homogeniseeritud altimeeter Jason-2 suhtes. Altimeetri andmesüsteemi geograafilise katvuse ulatuseks on 25 °W – 42 °E ja 21 °N – 66 °N. Muutuvateks suurusteks on pikkuskraad, laiuskraad, meretaseme anomaalia, aeg, ja tsükkel. Horisontaalne resolutsioon on seitse kilomeetrit (Mertz jt 2016).

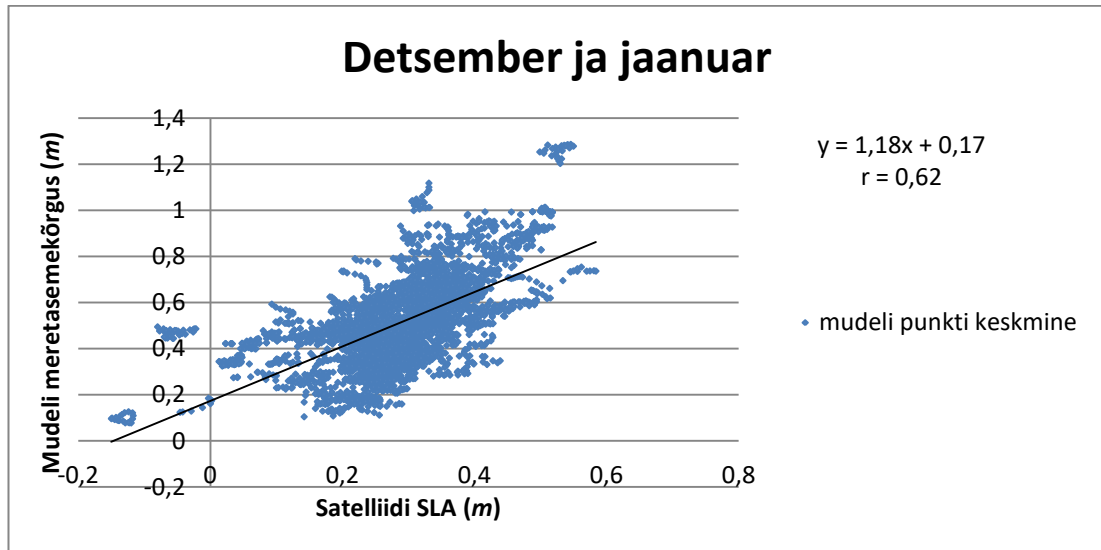
3.2.2 Mudeli andmed

Läänemere mudeli produkt annab prognoosi füüsiliste parameetrite kohta Läänemerele. Prognoosi uuendatakse kaks korda päevas ning lisatakse kahe uue päeva prognoos. Andmed on esitatud tunnise resolutsiooniga merepinna parameetritele: meretaseme variatsioonidele, jää kontsentratsioonile ja paksusele ning 3D-parameetritele: temperatuurile ja soolsusele. Produkti ruumiline resolutsioon on umbes 1 meremiil ehk 1,8 kilomeetrit koos 25 vertikaalse sügavustasemega. Produkti geograafiline katvus on 9 °E – 30 °E ; 53 °N – 66 °N ehk terve Läänemere ala kuni üleminekuni Põhjamereks (s.t Taani väinad, Kattegat ja Skagerrak). Produkt pakub mudeli tunni andmeid ja päeva keskmisi väärtusi. Produkt põhineb HBM (HIROMB-BOOS-Model) ookeani mudeli simulatsioonil (Huess 2016).

4. TULEMUSED JA ANALÜÜS

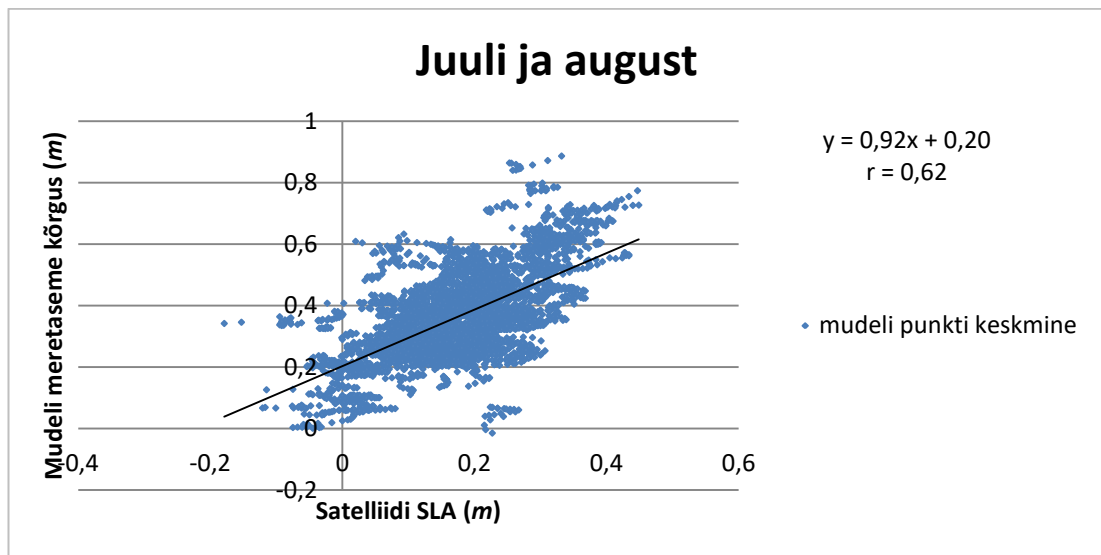
4.1 Tulemused

Joonisel 3 on kujutatud altimeetri meretaseme anomaaliad ehk SLA-d ja prognoosimudeli meretaseme kõrgusandmed talvekuudel 2016. aasta detsembrist kuni 2017. aasta jaanuari lõpuni. Satelliidi SLA varieerub $-0,14$ meetrist $0,58$ meetrini. Prognoosimudeli meretaseme kõrgus varieerub $0,13$ meetrist $1,28$ meetrini. Korrelatsioonikordaja r on $0,62$. Joonis 3 kajastab selget erinevust altimeetri ja prognoosimudeli andmete vahel. Mudeli meretaseme prognoos on valdavalt osas kõrgem kui altimeetri SLA.



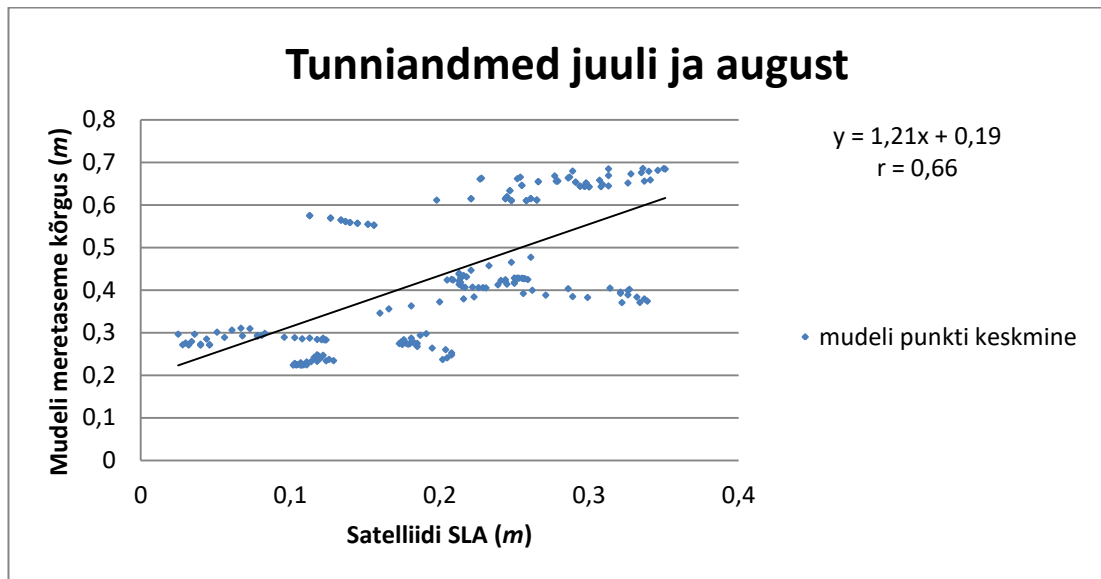
Joonis 3. Detsembri ja jaanuari päeva keskmiste veetaseme andmete graafik

Joonisel 4 on kujutatud altimeetri SLA-d ja prognoosimudeli meretaseme kõrgusandmeid suveperioodil juulist augustini 2016. SLA varieerub $-0,18$ meetrist $0,45$ meetrini. Prognoosimudeli meretaseme kõrgus varieerub $-0,02$ meetrist $0,89$ meetrini. Korrelatsioonikordaja r on $0,62$. Jooniselt 4 on näha erinevust altimeetri ja prognoosimudeli andmete vahel. Mudeli meretaseme prognoos on seega kõrgem kui SLA.



Joonis 4. Juuli ja augusti päeva keskmiste veetaseme andmete graafik

Joonisel 5 on esitatud altimeetri ja mudeli juuli ja augusti kõrgusandmete tunni keskmiste erinevus. SLA varieerub vahemikus $0,03$ – $0,35$ meetrit. Mudeli meretaseme kõrgus jääb vahemikku $0,22$ – $0,68$ meetrit. Korrelatsioonikordaja r on $0,66$. Ka tunniandmete puhul on näha, et mudeli meretaseme prognoos on enamasti kõrgem kui SLA.



Joonis 5. Juuli ja augusti tunni keskmiste veetaseme andmete graafik

4.2 Statistikud

Tabelis 1 on esitatud statistikute väärtused satelliidi SLA ja prognoosimudeli meretaseme kõrguse vahel detsembri ja jaanuari päeva keskmiste, juuli ja augusti päeva keskmiste ning juuli ja augusti tunni keskmiste andmete jaoks.

Prognoosimudeli meretaseme kõrguse ja SLA vahelised *bias*-väärtused jäävad vahemikku 0,19–0,23. Kõrgeim on *bias*-väärtus juuli ja augusti tunni keskmiste andmete korral (0,23). Väikseim on *bias*-väärtus juuli ja augusti päeva keskmiste korral (tabel 1).

RMSE väärtused jäävad vahemikku 0,22–0,27. Suurim RMSE väärtus on saadud detsembri ja päeva keskmiste andmetega (0,27) ning väikseim juuli ja augusti päeva keskmiste andmetega (0,22) (tabel 1).

Pearsoni korrelatsioonid ehk lineaarsed korrelatsioonid (tabel 1) on iga perioodi andmete jaoks positiivsed ning jäävad vahemikku 0,62–0,66. Suurim korrelatsioon on leitud juuli–augusti tunni keskmiste andmete vahel. Detsembri ja jaanuari ning juuli ja augusti tunniandmete korrelatsioon on sama väärtusega (0,62).

Tabelis 1 esitatud p -väärtused ehk statistilise olulisuse väärtused on kõikide perioodide puhul väiksemad kui 0,05.

Standardhälbed on iga perioodi jaoks arvutatud SLA-le, mudeli meretaseme kõrguse andmetele ja mudeli punkti keskmistele andmetele. SLA standardhälbed jäävad iga perioodi korral samaks (0,09). Mudeli meretaseme standardhälbed jäävad vahemikku 0,14–0,18. Suurim mudeli meretaseme standardhälve (0,18) on detsembri ja jaanuari päeva keskmiste andmete puhul ning väiksem juuli ja augusti päeva keskmiste andmete puhul (0,14). Mudeli punkti keskmine standardhälve jääb samuti vahemikku 0,14–0,18. Suurim on standardhälve samuti detsembri ja jaanuari päeva keskmiste andmete korral (0,18) ning väikseim juuli ja augusti päeva keskmiste andmete puhul (0,14).

Tabel 1. Statistikut; SD ehk standardhälve

Periood	<i>Bias</i>	RMSE	r	P - väärtus	SD (satelliit)	SD (HBM)	SD (HBM kesk)
Dets–jaan päev	0,22	0,27	0,62	< 0,05	0,09	0,18	0,18
Juuli–aug päev	0,19	0,22	0,62	< 0,05	0,09	0,14	0,14
Juuli–aug tund	0,23	0,26	0,66	< 0,05	0,09	0,15	0,16

4.3 Järeldused

Bias-väärtus oli suurim juuli ja augusti tunni keskmiste andmete puhul, seega on SLA ja mudeli andmete vahe kõige suurem sel perioodil. See võib olla põhjustatud andmehulga väiksusest. Kõige väiksem oli mudeli meretaseme kõrguse prognoosi ja SLA vaheline *bias*-väärtus juuli ja augusti päeva keskmiste andmete vahel. Seega langevad juuli ja augusti päeva keskmiste andmete puhul altimeetri ja mudeli kõrgusandmed kõige paremini kokku.

RMSE väärtus oli suurim detsembri ja jaanuari päeva keskmiste andmete puhul, mis näitab, et erinevus SLA ja mudeli andmete vahel sel perioodil on kõige suurem. Kõige väiksem on RMSE juuli ja augusti päeva keskmiste andmete puhul, seega on erinevus SLA ja mudeli andmete vahel sel perioodil kõige väiksem.

Kõigi perioodide puhul on korrelatsioonikordaja r positiivne, mis näitab, et SLA kasvades suureneb ka mudeli meretaseme prognoos. Korrelatsioonikordaja jääb vahemikku $0,3 < r < 0,7$, mis näitab keskmise tugevusega seost andmete vahel. Suurim korrelatsioon ehk tugevaim seos on juuli ja augusti tunni keskmiste andmete puhul.

P -väärtused on kõigi perioodide puhul väiksemad kui 0,05, mis näitab, et andmed on statistiliselt olulised. Seega saab järeldada, et tulemused ei ole saadud juhuslikult.

Kõige väiksemad standardhälbed on SLA-l, mis näitab, et altimeetri mõõdetud väärtused on üsna keskmise väärtuse ümber. Nii altimeetri kui mudeli korral olid juuli ja augusti päeva keskmiste andmete standardhälbed kõige väiksemad. Tulemustest selgus, et veetase kõikus suvel vähem kui talvel. Saab järeldada, et mudeli punkti P_i' standardhälbe leidmine ei muuda tulemusi. See näitab, et prognoosi produkti punkti P_i ümber olevate punktide muutlikus on väike. Detsembri ja jaanuari suur standardhälve võib olla tingitud jääoludest, mille mõjusid pole selles töös arvestatud.

Kõigi perioodide puhul on näha, et mudeli meretaseme prognoos on valdavalt kõrgem kui SLA. Erinevus SLA ja meretaseme prognoosi vahel võib tuleneda sellest, et altimeetri andmetes esineb rohkem n-ö saastavaid mõjureid, sest rannikuvetes ja rannajoone lähedal esineb suurem maapinna mõju radariantenni suure katvuse suhtes, loodete variatsioonid ning kiired atmosfääri variatsioonid. Tabelist 1 on näha, et kõige paremini langesid SLA ja mudeli meretaseme prognoos kokku juuli ja augusti päeva keskmiste andmete puhul. Küll aga on tunniandmete võrdlus kõige paremas omavahelises korrelatsioonis. Tunniandmete teiste statistikute väärtused on kehvemad andmehulga väiksuse tõttu. Kõige halvem tulemus saadi detsembri ja jaanuari päeva keskmiste andmete puhul, mis võib olla tingitud talvistest jääoludest, mille mõjudega antud töös pole arvestatud.

5. KOKKUVÕTE

Töö eesmärk oli prognoosimudeli veetaseme andmete võrdlemine altimeetri andmetega. Andmete võrdlus viidi läbi detsembri ja jaanuari päeva keskmiste, juuli ja augusti päeva keskmiste ning juuli ja augusti tunni keskmiste veetasemete andmete vahel.

Altimeetri ja mudeli punktide vahelise minimaalse distantsi leidmiseks kasutati töös *haversine*'i valemit. Andmetöötlus tehti MATLAB-i keskkonnas.

Tulemustest selgus, et prognoosimudeli ja altimeetri veetaseme andmete vahel oli selge erinevus. Nii detsembri ja jaanuari päeva keskmiste kui ka juuli ja augusti päeva ning tunni keskmiste veetaseme andmete puhul oli näha, et mudeli meretaseme prognoos on valdavalt kõrgem kui altimeetri meretaseme anomaalia ehk SLA. Erinevus prognoosimudeli ja altimeetri andmete vahel võib tuleneda sellest, et altimeetri andmetes esineb rohkem n-ö saastavaid mõjureid, sest rannikuvetes esineb suurem maapinna mõju radariantenni suure katvuse suhtes, loodete variatsioonid ning kiired atmosfääri variatsioonid. Suurim erinevus andmete vahel oli juuli ja augusti tunni keskmiste andmete korral, kuid samas olid tunni keskmised andmed parimas korrelatsioonis. See võib tuleneda andmehulga väiksusest. Suurim erinevus altimeetri ja mudeli andmete vahel oli detsembri ja jaanuari päeva keskmiste andmete puhul. See võib tuleneda talvistest jääoludest, millega selles töös ei arvestatud.

Töö teema on väga huvitav ja aktuaalne, sest meretaseme prognoosimine mudelitega on tänapäeval kiirestiarenev valdkond. Tööd saab jätkata: kasutada saab suuremat andmehulka ning arvestada ka talviste jääoludega. Võimalik on uurida ka suvekuude meretaseme kõikumise põhjuseid, mida selles töös ei uuritud.

Tänuavaldused

Autor avaldab tänu Sander Rikkale töö juhendamise ja ning väärtuslike nõuannete eest.

6. KASUTATUD KIRJANDUS

Alari, V., Kõuts, T. (2012). Simulating wave-surge interaction in a non-tidal bay during cyclone Gudrun in January 2005. Baltic International Symposium (BALTIC).

Altimetry History. Aviso Satellite Altimetry Data. [WWW] <http://www.aviso.altimetry.fr/en/techniques/altimetry/history.html> (13.03.2017)

Bellis, M. (2016). History of the Altimeter. Measuring Distance Above Sea Level or the Ground Below Aircraft. [WWW] <https://www.thoughtco.com/history-of-altimeter-4075457> (20.04.2017)

Baltic Operational Oceanographic System (BOOS). BOOS. [WWW] <http://www.boos.org/roos/baltic-operational-oceanographic-system-boos/> (21.04.2017)

Chai, T., Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 7(3), 1247-1250.

Ekman, M. (2009). The changing level of the Baltic Sea during 300 years: a clue to understanding the Earth. Åland Islands: Summer Institute for Historical Geophysics.

Fu, L. L., Cazenave, A. (2000). Satellite altimetry and earth sciences: a handbook of techniques and applications. Vol.69. Academic Press.

Huess, V. (2016). Product user manual for Baltic Sea Physical Analyses and Forecasting Product. [WWW] <http://cmems-resources.cls.fr/documents/PUM/CMEMS-BAL-PUM-003-006.pdf> (15.04.2017)

Hünicke, B. (2008). Atmospheric forcing of decadal Baltic Sea level variability in the last 200 years: A statistical analysis. Doktoritöö.

Jason-2 : using satellite altimetry to monitor the ocean. European Organisation for Meteorological Satellites. [WWW] https://www.eumetsat.int/jason/print.htm#page_1.7.0 (20.04.2017)

Leppäranta, M., Myrberg, K. (2009). Physical oceanography of the Baltic Sea. Springer Science & Business Media.

Mertz, F., Rosmordoc, V., Maheu, C. (2016). Product user manual for sea level SLA products. [WWW] <http://cmems-resources.cls.fr/documents/PUM/CMEMS-SL-PUM-008-017-033.pdf> (15.04.2017)

Prouzet, P. (2016). Tools for Oceanography and Ecosystemic Modeling. John Wiley & Sons.

Sandwell, D. T., Smith, W. H. (1997). Exploring the ocean basins with satellite altimeter data. National Geophysical Data Center (NGDC), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Shay, L. K. (2010). Encyclopedia of ocean sciences. *Elsevier Ltd.*

Shennan, I., Long, A. J. Horton, B. P. (2015). Handbook of sea-level research. John Wiley & Sons.

Stramska, M., Chudziak, N. (2013). Recent multiyear trends in the Baltic Sea level. *Oceanologia* 55.2: 319-337.

Stramska, M., Kowalewska-Kalkowska, H., Świrgoń, M. (2013). Seasonal variability in the Baltic Sea level. *Oceanologia* 55.4: 787-807.

Veness, C. (2011). Calculate distance and bearing between two Latitude/Longitude points using Haversine formula in JavaScript. Movable Type Scripts.

Wolski, T., Wiśniewski, B., Giza, A., Kowalewska-Kalkowska, H., Boman, H., Grabbi-Kaiv, S., ... & Lydeikaitė, Ž. (2014). Extreme sea levels at selected stations on the Baltic Sea coast. *Oceanologia*, 56(2), 259-290.