



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Kadi Õunas

**SATELLIIDI SENTINEL-3 ALTIMEETRIA ANDMETE
VALIDEERIMINE LÄÄNE-EESTI RANNIKULÄHEDASTEL
ALADEL**

VALIDATION OF SENTINEL-3 ALTIMETRY DATA ON THE
NEAR COASTAL AREA OF WEST-ESTONIA

Magistritöö
Geodeesia ja maakorralduse õppekava

Juhendaja: dotsent Aive Liibusk, *PhD*

Tartu 2019

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Kadi Õunas		Õppekava: Geodeesia ja maakorraldus	
Pealkiri: Satelliidi Sentinel-3 altimeetria andmete valideerimine Lääne-Eesti rannikulähedastel aladel			
Lehekülgi: 99	Jooniseid: 48	Tabeleid: 12	Lisasid: 3
<p>Õppetool: Geomaatika</p> <p>ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood: 4. Loodusteadused ja tehnika, Geodeesia P515</p> <p>Juhendaja: dotsent Aive Liibus (PhD)</p> <p>Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2019</p>			
<p>Magistritöö eesmärgiks on satelliitide Sentinel-3A ja Sentinel-3B altimeetria andmete valideerimine Lääne-Eesti rannikulähedastel aladel GNSS mõõtmiste ning veemõõdujaama andmete abil. Töö eesmärgi täitmiseks on Eesti Maaülikooli õppejõudude Aive Liibus ja Kristina Türk poolt teostatud välimõõtmised Läänemerele ning Dirhami sadamas. Töö autor kogus Sentinel-3A ja Sentinel-3B altimeetria andmed vastavalt juuni 2016 kuni detsember 2018 (Sentinel-3A) ja detsember 2018 kuni märts 2019 (Sentinel-3B) ajavahemike kohta.</p> <p>Altimeetria andmete valideerimiseks on nii välimõõtmiste käigus saadud andmed kui ka altimeetria andmed eelnevalt filtreeritud ja puhastatud. Altimeetria ja veemõõdujaama andmete omavaheliseks võrdluseks on GNSS mõõtmisi kasutades leitud kõrguste erinevus Dirhami veemõõdujaama ja valideerimispunktide vahel ($\Delta GNSS$). Samuti on leitud EST-GEOID2017 kõrguslik muutus Dirhami veemõõdujaama ja valideerimispunktide vahel ($\Delta geoid$). Lisaks eelnimetatud paranditele on kõrguste võrdlemise juures arvestatud ka merepinna hetke topograafiaga ($\Delta HBM-EST$). Leitud parandeid kasutades arvutati veetaseme kõrgused valideerimispunktidesse iga valitud ülelennu jaoks.</p> <p>Kõrguste võrdlemise tulemusena leiti, et Sentinel-3A altimeetria andmed on võimalik Läänemere rannikulähedases piirkonnas saada $0,04 \pm 0,13$ m ($SSH_A - SSH_{geoid}$) ja $0,04 \pm 0,14$ m ($SSH_A - SSH_{GNSS}$) täpsusega ning Sentinel-3B andmed $0,13 \pm 0,09$ m ($SSH_A - SSH_{geoid}$) ja $0,14 \pm 0,09$ m ($SSH_A - SSH_{GNSS}$) täpsusega. Sentinel-3B andmete halvem täpsus on tingitud vähesest ülelendude arvust ning valitud ülelendude sattumisest talvisele</p>			

perioodile, kus segavaks faktoriks on jääkate Läänemerel. Olgugi, et Sentinel-3A puhul saavutati üsna hea täpsus, ei saa öelda, et satelliitaltimeetria abil on võimalik määrata merepinna kõrgus sama täpselt kui veemõõdujaamadega. Küll aga saame öelda, et satelliitaltimeetria abil on merepinna kõrguse määramine ulatuslikum ning soodsam.

Märksõnad: satelliitaltimeetria, kaugseire, Läänemeri, veemõõdujaam, valideerimine

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Kadi Õunas		Speciality: Land Surveying and Land Management	
Title: Validation of Sentinel-3 altimetry data on the near coastal area of West-Estonia			
Pages: 99	Figures: 48	Tables: 12	Appendixes: 3
Chair: Geomatics Field of research and (CERC S) code: 4. Natural Sciences and Engineering, Geodesy P515 Supervisors: assistant professor Aive Liibusk (PhD) Place and date: Tartu 2019			
<p>The aim of this thesis is absolute validation of satellites Sentinel-3A and Sentinel-3B altimetry data on the coastal area of West-Estonia using the GNSS measurements and tide gauge (TG) data. To complete the task at hand two lecturers of Estonian University of Life Sciences Aive Liibusk and Kristina Türk have done measurements on the Baltic sea and the port of Dirhami. In addition there is altimetry data gathered by the author of the thesis of Sentinel-3A and Sentinel-3B. To validate altimetry data GNSS measurements and gathered altimetry data that has been filtered and purified before.</p> <p>The comparison of altimetry and tide gauge data is based on the difference between the altitudes found using GNSS measurements between the Dirhami's TG and the validation points ($\Delta GNSS$). What has also been found is the high change in the EST-GEOID2017 between Dirhami's TG and validation points ($\Delta geoid$). In addition to the above corrections sea surface topography is also taken into account when comparing heights ($\Delta HBM-EST$). Based on the discovered parameters the water level was calculated into validation points for each pass.</p> <p>Comparing the height measurements it was discovered that Sentinel-3A altimetry data is possible to receive with the accuracy of $0,04 \pm 0,13$ ($SSH_A - SSH_{geoid}$) and $0,04 \pm 0,14$ ($SSH_A - SSH_{GNSS}$ method) and Sentinel-3B data with the accuracy of $0,13 \pm 0,09$ ($SSH_A - SSH_{geoid}$ method) and $0,14 \pm 0,09$ ($SSH_A - SSH_{GNSS}$ method). Sentinel-3B's bad accuracy is due to fewer number passes and choosing the passes schedule to be set on the winter period, where the interfering factor is the cover of ice on the Baltic Sea. As it may be, the Sentinel-3A achieved a decent accuracy, we can't say that using the satellite altimetry it</p>			

is possible to pinpoint the sea level as accurately as with tide gauges. However we can say that using satellite altimetry we can get a far more extensive and cheaper assessment than using tide gauges.

Keywords: satellite altimetry, remote sensing, the Baltic Sea, tide gauge, validation

SISUKORD

SISSEJUHATUS	8
1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE.....	10
1.1. Satelliitaltimeetria olemus	10
1.2. Satelliitaltimeetriaga seotud põhilisemad parameetrid	12
1.2.1. Kepleri orbiidi elemendid	12
1.2.2. Satelliitaltimeetrias kasutatavad altimeetrid ning sagedused	15
1.2.3. Signaali peegeldumine veepinnalt ja radar-altimeetri jalajälg	16
1.3. Satelliitaltimeetria missioonid	18
1.4. Copernicuse programm ja Sentinel-3 satelliitmissioon	22
1.4.1. Sentinel-3 parameetrid.....	26
1.5. Rannikulähedase satelliitaltimeetria valideerimine	28
2. MATERJAL JA METOODIKA.....	33
2.1. Uurimistöö objekt	33
2.2. Välitööd ja andmete eeltöötlus	34
2.2.1. GNSS baaspunkti koordineerimine	35
2.2.2. Veemõõdulati kõrguslik sidumine.....	37
2.2.3. GNSS mõõtmised väikelaeval	40
2.2.4. Laeva liikumiskiiruse parandi arvutamine	42
2.2.5. Dirhami veemõõdujaama andmed	44
2.3. Merel mõõdetud andmete töötlus	46
2.4. Altimeetria andmete kogumine.....	50
2.4.1. Töös kasutatud altimeetria andmed	55
2.4.2. Programmi BRAT lühitutvustus.....	58
2.5. Altimeetria andmete töötlus.....	59
3. TULEMUSED JA ARUTELU	62
3.1. Merepinna topograafia mõju veetaseme kõrgustele	62
3.2. Altimeetria andmete võrdlemine veemõõdujaama andmetega	65
3.2.1. Trassi valideerimine	71
3.3. Dirhami VMJ andmete võrdlemine Soome VMJ andmetega.....	75
3.4. Tulemuste võrdlus varasemate uurimistulemustega	75
KOKKUVÕTE	78

KASUTATUD KIJANDUS	80
LISAD	87
Lisa 1. Kinemaatilisel ja RTK meetodil mõõdetud punktide võrdlus <i>Start</i> , <i>Validation</i> ja <i>Stop</i> punktides	88
Lisa 2. Altimeetria ja veemõõdujaama veetaseme kõrguste võrdlused <i>Validation</i> ja <i>Stop</i> punktides (Sentinel-3A) ajavahemikus juuni 2016 kuni detsember 2018 ning <i>Start</i> punktis (Sentinel-3B) vahemikus detsember 2018 kuni märts 2019.....	91
Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta.....	99

SISSEJUHATUS

Vesi katab ligikaudu 70% Maa pinnast ning on pidevas ringluses, tuues endaga kaasa nii asendilised, kui ka kõrguslikud veepinna muutused. Veetaseme määramine võimalikult täpselt ning ajakohaselt on aluseks nii lokaalsete prognooside koostamiseks kui ka globaalsete katastroofide ära hoidmiseks. Väga pikka aega on veetaseme kõrgust määratud veemõõdujaamade (VMJ) andmetega, mis on ajakulukas ning mitte väga ulatuslik meetod. Viimase viiekümne aasta jooksul on veetaseme määramiseks hakatud kasutama ka satelliitaltimeetriat (SA – *Satellite Altimetry*). Kui algusaastatel oli võimalik veetaseme kõrgused määrata paari meetri täpsusega, siis viimase kahekümne aasta jooksul on saavutatud sentimeetri täpsus.

Just täpsus ning kontrollitavus on see, mis muudavad mõõtmisandmed väärtuslikuks. Kogutud andmetel ei ole mingit väärtust, kui me ei saa nende õigsuses kindlad olla. Olgugi et satelliitaltimeetria andmete kogumine on lihtne ning kiire, siis nende andmete õigsuse kontrollimine on märksa aeganõudvam ning keerulisem protsess. Käesolevas uurimistöös antakse ülevaade Sentinel-3 missiooni altimeetria andmete rannikulähedastest kontrollimisest ehk valideerimisest.

Magistritöö eesmärgiks on satelliitide Sentinel-3A ja Sentinel-3B altimeetria andmete valideerimine Lääne-Eesti rannikulähedastel aladel GNSS mõõtmiste ning veemõõdujaama andmete abil. Uurimistöö tulemus peaks kinnitama hüpoteesi, et Sentinel-3A ja Sentinel-3B altimeetria andmetega on võimalik määrata Läänemere merepinna kõrgus rannikulähedastel aladel veemõõdujaamale sarnase täpsusega.

Teema on aktuaalne, sest Sentinel-3A saadeti orbiidile 2016. aastal ja Sentinel-3B 2018. aastal ning nende altimeetria andmete täpsust ei ole jõutud ulatuslikult Eesti aladel kontrollida. Sentinel-3 missiooni üheks eesmärgiks on tagata veetaseme mõõtmine rannikulähedastel aladel 2-3 cm täpsusega (ESA, 2012). Eelnevate uurimistööde käigus ei ole seda täpsust saavutatud, mistõttu on oluline Sentinel-3 altimeetria andmete täpsust jätkuvalt kontrollida.

Töös on kasutatud Sentinel-3A ja Sentinel-3B altimeetria andmeid, Dirhami veemõõdujaama ja GNSS mõõtmiste andmeid. Uurimistöö eesmärgi täitmiseks on püstitatud järgnevad tööülesanded:

- leida GNSS mõõtmiste parand ning geoidi pinna muutuse parand veemõõdujaama ja valideerimispunktide vahel;
- leida valitud ülelendude altimeetria andmed valideerimispunktides;
- lisada merepinna topograafiast tulenev parand;
- leida GNSS mõõtmiste parandit ja geoidi pinna muutuse parandit kasutades merepinna kõrgus valideerimispunktides iga ülelennu jaoks;
- võrrelda omavahel altimeetria andmete ning parandite abil leitud kõrgusi valideerimispunktides.

Uurimistöö on jagatud kolmeks põhilisemaks osaks: kirjanduse ülevaade, materjal ja meetoodika ning tulemuste analüüs. Kirjanduse ülevaates tuuakse välja satelliitaltimeetria olemus, sellega seotud parameetrid ning andmete valideerimine rannikulähedastel aladel. Samuti antakse ülevaade erinevatest satelliitaltimeetria missioonidest ning detailsem ülevaade Sentinel-3 missioonist. Materjal ja meetoodika osas on detailselt kirjeldatud töös kasutatud andmete kogumist ning töötlemist. Kolmandas osas on saadud tulemusi analüüsitud ning võrreldud eelnevate uurimistööde käigus saadud tulemustega. Antud töös on kasutatud rahvusvahelist Harvardi viitamissüsteemi.

Uurimistööd toetati ETAG PUT1553: "Läänemere viimase 70 aasta geotsentrilise meretaseme- ja maatõusu määramine kasutades satelliitaltimeetria (1.01.2017–31.12.2020)" vahenditest.

1. KIRJANDUSE ÜLEVAADE

1.1. Satelliitaltimeetria olemus

Satelliitaltimeetria (SA – *Satellite Altimetry*) mõiste all mõeldaks eelkõige veetaseme kõrguse mõõtmist satelliidilt. See võimaldab mõõta veetaseme kõrgust ning jälgida maailma ookeani pinda globaalselt (Cheng, 2004). Just globaalsed võimalused ning enneolematu täpsus on need, mis muudavad SA asendamatuks meetodiks maailmamere jälgimisel ning uurimisel. Praegusel hetkel on võimalik globaalsed SA andmed saada ajalise lahutusvõimega 1-2 nädalat ning ruumilise lahutusvõimega umbes 50 km (Cheng, 2004). Võimalik on andmeid saada ka ruumilise lahutusvõimega alla 10 km (nt CyroSat-2), aga sellisel juhul tuleb leppida ajalise lahutusvõimega enam kui 1 aasta (AVISOa, n.d.). Juhtivatest satelliitaltimeetria missioonidest kõige väiksema ajalise lahutusvõimega on satelliit Jason-2, 9,9156 päeva (AVISOb, n.d.). Ruumilist lahutusvõimet on võimalik parandada ühe missiooni raames kahe identse satelliidi orbiidile saatmisega, omavahelise orbiidi nihkega. Sellisel juhul väheneb ruumiline lahutusvõime ekvaatoril kaks korda (ESAa, n.d.).

Satelliitaltimeetria on mainitud mere veetaseme mõõtmiseks juba 1969. aastal Williamsdowni kongressil (Kaula, 1969). Kongressi raportis on välja toodud eesmärk mõõta merepinda 10 cm täpsusega (Kaula, 1969). Sellise täpsuse saavutamiseks tuli lahendada probleemid seoses kasutatavate instrumentidega ning elektromagnetlainete hajumisega veepinnal (Kaula, 1969).

Satelliitaltimeetria põhineb elektromagnetilise radarimpulsi väljasaatmisel radarist ning aja mõõtmisel, mis kulub impulsil radaris tagasijõudmiseks (Cheng, 2004). Lihtsustatult tähendab see radarimpulsi välja saatmist ning veepinnani jõudmiseks ja tagasi peegeldumiseks radaris kuluva aja mõõtmist. Kuluvat aega mõõdetakse ülitäpsete aatomkelladega. Mõõdetud aja järgi on võimalik arvutada satelliidi kõrgus veepinnast (h), kasutades valemit 1.1 (Shum, et al., 1995):

$$h = c \frac{\Delta t}{2}, \quad (1.1)$$

kus c on valguse liikumise kiirus ning Δt impulsil kulunud aeg. Selleks, et arvatud kõrgus oleks usaldusväärne ning seda saaks rakendada geodeesias ja okeanograafias, tuleb saadud kõrgust mitmete paranditega paranda. Sisse viidavad parandid võtab kokku valem 1.2 (Tapley, et al., 1982; Nerem, et al., 1990):

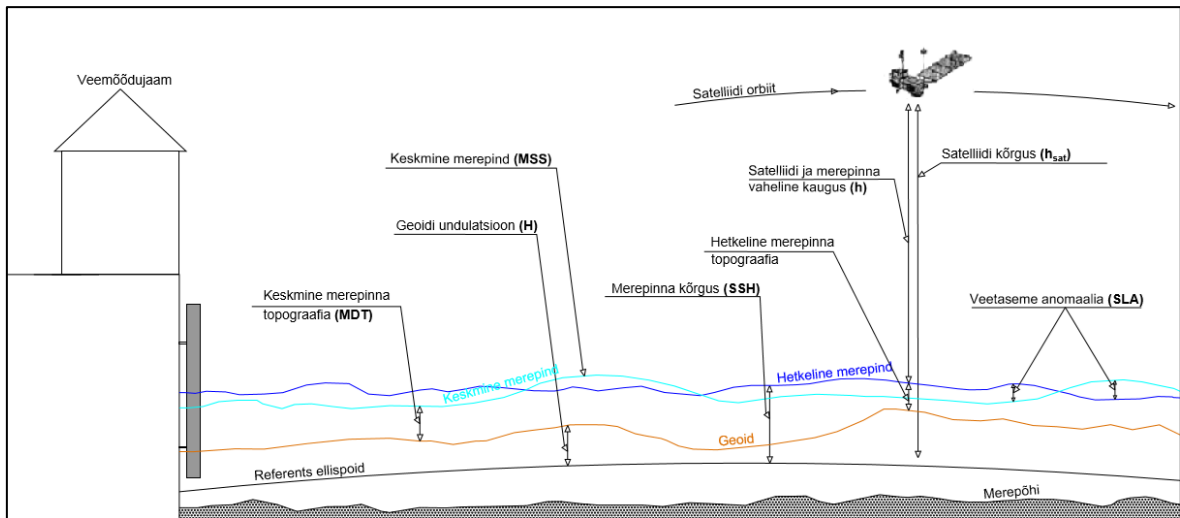
$$h_{\text{parandatud}} = h + h_c + h_{\text{iono}} + h_{\text{wet}} + h_{\text{dry}} + h_{\text{baro}} + h_{\text{otide}} + h_{\text{etide}} + h_{EM} + b + \varepsilon, \quad (1.2.)$$

kus h on hetkekaugus altimeetria ja ookeani pinna vahel (*the instantaneous distance between the altimeter antenna and the ocean surface*); h_c altimeetria antenni nihke parand (*the correction for the displacement of the altimeter antenna from the spacecraft centre of mass*); h_{wet} troposfääri niiskuse parand (*the wet troposphere correction*), h_{dry} troposfääri kuivuse parand (*the dry troposphere correction*); h_{iono} ionosfääri parand (*the ionosphere correction*); h_{baro} pöördparomeetri parand (*the inverse barometer correction*); h_{otide} ookeani loodete parand (*the ocean tide correction*); h_{etide} Maa tõusulainete parand (*the solid Earth tide correction*); h_{EM} EM kalduvuse või mereseisundi parand (*the EM bias or sea-state correction*); b võimalik h kalduvuse parand (*the correction for a possible bias in h*) ning ε juhuslike ning süstemaatiliste altimeetria mõõtmisvigade parand (*the contribution of random and systematic errors to the altimeter measurements*).

Selleks, et teada saada mõõdetud veepinna absoluutne kõrgus ning asukoht, on altimeetriaale juurde lisatud absoluutne asukoha määramise süsteem ehk GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Teades satelliidi täpset asukohta ning kõrgust (h_{sat}) saab arvutada absoluutse veetaseme kõrguse (SSH_A) (vt valem 1.3) (Shum, et al., 1995):

$$SSH_A = h_{\text{sat}} - h_{\text{parand}}. \quad (1.3.)$$

Kogu SA põhimõtte võtab kokku joonis 1.1.



Joonis 1.1. Satelliitaltimeetria põhimõtet iseloomustav joonis. (Abdullah (2018) põhjal)

Satelliitaltimeetria andmeid kasutatakse lisaks veepinna kõrguste mõõtmiseks ka ookeani magnetsignaalide ringluse tuvastamiseks (Saynisch, et al., 2018), ookeani monitooringuks, keskmise veetaseme määramiseks (MSS – *Mean Sea Surface*) (Nerem, R. S. & National Centre for Atmospheric Research Staff, 2016), jäämasside muutuste hindamiseks (Otaegi, 2015) ning veetaseme muutuste hindamiseks (Cazenave, et al., 2018). Samuti on altimeetria andmete abil võimalik tuvastada looduskatastroofe. Näiteks oli tuvastatav orkaan Katrina, mis leidis aset 25.-27. augustil 2005 USA kaguosas (Scharroo, et al., 2005). Altmeetria andmed näitasid esmakordselt tormitõusu ning orkaani intensiivistumist dünaamilise topograafiaga aladel (Scharroo, et al., 2005).

1.2. Satelliitaltimeetriaga seotud põhilisemad parameetrid

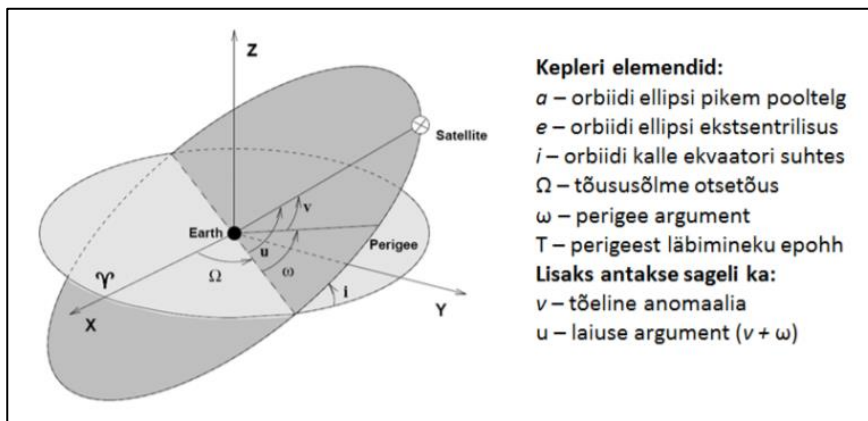
1.2.1. Kepleri orbiidi elemendid

Täpsete altimeetria andmete saamine algab juba õigete orbiidi parameetrite, kasutatavate instrumentide ning mõõtmisageduste valimisel. Satelliidi võimalikult täpse asukoha määramine on täpsete altimeetria andmete saamise võtmesõnaks. Satelliidi orbiidi ja kellade tundmine on ülioluline satelliidi õigeks positioneerimiseks.

Satelliidi orbiiti on võimalik kirjeldada kuue Kepleri elemendiga (Seeber, 1993):

- Ω – tõususõlme otsetõus, nurk X-telje ja tõususõlme (punkt satelliidi orbiidil, kus see ristub Maa ekvaatori tasandiga) vahel;
- i – inklinatsiooni nurk ehk orbiidi kalle ekvaatori suhtes ehk nurk Maa ekvaatori tasandi ja orbiidi tasandi vahel;
- ω – perigee argument ehk nurk tõususõlme suuna ja orbiidil oleva perigee punkti (punkt orbiidil, kus satelliit on Maale kõige lähemal) vahel;
- a – orbiidi ellipsi pikem pooltelg;
- e – orbiidi ellipsi ekstsentrilisus ja
- T – perigeest läbimineku epohh.

Kepleri elemendid on välja toodud joonisel 1.2, kus lisaks eelnimetatud elementidele on märgitud ka tõeline anomaalia (v) ja laiuse argument ($v + \omega$).



Joonis 1.2. Geotsentrilises ristkoordinaatide süsteemis kujutatud Kepleri elemendid, kus XY-tasand on Maa ekvaatori tasand. (Kall, n.d.)

Kepleri element a määrab ära satelliidi kõrguse ning vastavalt satelliidi tiirlemiskõrgusele Maa suhtes saab jagada orbiidid: madalateks (*Low Earth Orbits*), keskmisteks (*Medium Earth Orbits*) ning geostatsionaarseteks orbiitideks (*Geostationary Orbit*). Madalad orbiidid on enamasti 180-2000 km kõrgusel Maast (Riebeek, 2009). Sellise kõrgusega orbiite kasutatakse kaugseireks, sõjaliseks otstarbeks ning Maa pildistamiseks (ESA, 2017a). Keskmise kõrgusega orbiidid jäävad vahemikku 2000-35780 kilomeetrit ning neid orbiite kasutavad näiteks GPS satelliidid. Geostatsionaarse orbiidi kõrguseks on 35786 kilomeetrit ning seda kasutavad peamiselt telekommunikatsiooni satelliidid (Seeber, 1993). Mida madalam on orbiit, seda kiiremini läbib satelliit ühe orbiidi ringi. Näiteks läbib NASA Aqua

satelliit 705 km kõrguse orbiidi 99 minutiga ning ilmastiku satelliit 36000 km kõrguse orbiidi 23 tunni 56 minuti ja 4 sekundiga (Riebeek, 2009).

Lisaks eelnevale jagatakse orbiite ka selle kuju järgi: kallutatud geosünkroonne (*Inclined Geo-synchronous Orbit*), eriti elliptiline (*Highly Elliptical Orbit*), polaar- (*Polar Orbit*) ning päikese-sünkroonne orbiit (*Sun-synchronous Orbit*) (Seeber, 1993). Polaarorbiit nagu nimigi ütleb läbib Maa polaarsetid piirkondi põhja-lõuna suunaliselt ning üldjuhul asuvad 200-1000 kilomeetri kõrgusel (ESA, 2017a). Kallutatud geosünkroonne orbiit on 24-tunnise tiirlemisperioodiga ringorbiit ning selle erinevus geostatsionaarsest orbiidist seisneb selles, et see on ekvaatori suhtes kallutatud (Seeber, 1993). Päikese-sünkroonne orbiit on sünkroniseeritud Päikesega, mis tähendab, et sellel orbiidil olev satelliit jälgib Maad sama nurga alt, mis Päike (ESA, 2017a). Päikese-sünkroonne orbiit sobib Maa vaatluseks, päikesekiirguse uuringuteks, ilmaennustamiseks ning luureks (ESA, 2017a).

Orbiidi kõrgus omakorda määrab ära satelliidi korduvusaja (*revisit time*) ehk selle aja, kui kiiresti jõuab satelliit tagasi samasse kohta (Rosmorduc, et al., 2018). Mida kõrgem on orbiit, seda suurem on satelliidi vaateväli ning seda vähem ülelende on vaja kogu Maa katmiseks. Tabelis 1.1 on välja toodud altimeetriaga seotud vajadused, mõjutegurid ning orbiidi parameetrid, millega vastavat vajadust rahuldada. Tabeli 1.1 põhjal võib öelda, et kõige olulistemaks parameetriteks on orbiidi kõrgus ning inklinatsiooninurk, kuna nende abil on võimalik kõige enam täita erinevaid altimeetriaga seotud vajadusi.

Tabel 1.1. Orbiidi parameetrite valikust sõltuvad tegurid (Rosmorduc, et al., (2018) põhjal)

Vajadus	Mõjutegurid	Orbiidi parameeter
Mõõtmiste sagedus	Vaatevälja laius, korduvuse aeg	Kõrgus
Globaalne ulatus	Maksimaalne laiuskraad, maapealsed trajektoorid hõredad	Inklinatsiooninurk, kõrgus
Korrapärane muster maapinnal	Sünkroonsus või orbiidi drift	Kõrgus
Korrapärane valgustatus	Päikese-sünkroonsus	Inklinatsiooninurk ja kõrgus
Aliasing of solar tides	Päikese-sünkroonsus	Inklinatsiooninurk ja kõrgus
Aliasing of all tides	Korduvuse periood	Kõrgus
Taevasfääri ligipääsetavus	Orbiidi pretsessioon	Inklinatsiooninurk ja kõrgus
Orbiidi katkemised	Orbiidi hoolduste sagedus	Kõrgus
Missiooni eluiga	Orbiidi lagunemine	Üldkõrgus
Instrumendi ruumiline lahutus/ radar saatja võimsus	-	Üldkõrgus
Radari impulsi saatmise sagedus (<i>PRF – pulse repetition frequency</i>)	-	Kõrguse ulatus
Püsivalt külma kiirgavad pinnad	Päikese-sünkroonsus	Inklinatsiooninurk ja kõrgus

1.2.2. Satelliitaltimeetrias kasutatavad altimeetrid ning sagedused

Satelliitaltimeetrias kasutatavad altimeetrid võib jagada ühe- ning kaheageduslikeks. Kaheagedusliku altimeetri kasutamine võimaldab hinnata elektronide sisaldust ionosfääris ning selle läbi parandada altimeetri viivitust (Rosmorduc, et al., 2018). Tuntumad kaheageduslikud altimeetrid on Poseidon-3 (AVISOc, n.d.), RA (*Radar Altimetry*) (Kramer, n.d.) ning SRAL (*Synthetic Aperture Radar Altimeter*) (AVISOd, n.d.). Ühesageduslikest altimeetritest tuntumad on Siral (*SAR/Interferometric Radar Altimeter*) (AVISOe, n.d.), AltiKa (AVISOf, n.d.) ning SWIM (*Surface Waves Investigation and Monitoring*) Radar CFOSAT (*Chinese-French Oceanography Satellite*) pardal (AVISOG, n.d.).

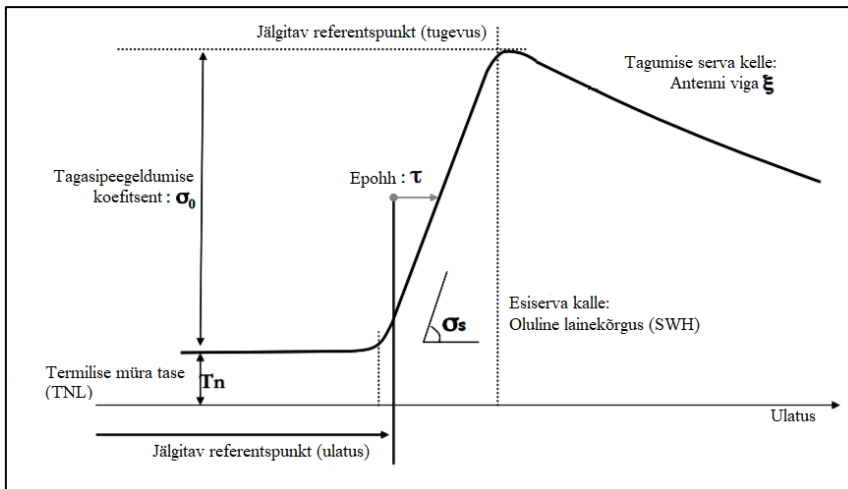
Satelliit altimeetrias kasutatavaid sagedusi on mitmeid. Igal kasutataval sagedusel on oma head ja vead ning sageduse valik sõltub regulatsioonidest, missiooni eesmärgist ja piirangutest ning tehnilistest võimalustest. Enim kasutatud sagedused on K_u (*Kurtz-Under*) (12-18 GHz), C (4-8 GHz), S (2-4 GHz) ja K_a (*Kurtz-Above*) (26,5-40 GHz). Neljast nimetatud sagedusest kõige tihedamini kasutatakse K_u sagedust, mis on parim kompromiss tehniliste võimaluste, olemasolevate ribalaiuste, atmosfääri ning ionosfääri mõjude

tundlikkuse vahel. C sagedus on võrreldes K_u sagedusega tundlikum ionosfääri mõjutustele ning vähem tundlik atmosfääri vedela vee efektile. C sageduse peamiseks ülesandeks on ionosfääri viivituse korrigeerimine koostöös K_u sageduse mõõtmistega. S sagedus on samuti mõeldud kombineerimiseks K_u sageduse mõõtmistega. K_a sageduse kasutamine sobib paremini jää, vihma, rannikualade, maismaade ja lainekõrguste jälgimiseks. K_a sagedus on tundlik troposfääri vee ja veeauru mõjudele. (ESA; CNESa, n.d.)

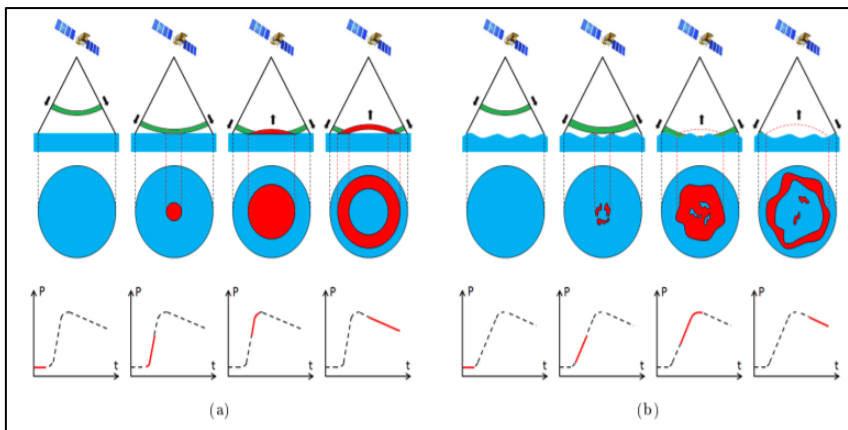
1.2.3. Signaali peegeldumine veepinnalt ja radar-altimeetri jalajälg

Signaali peegeldumine ning radar-altimeetria jalajälg veepinnal on määravateks parameetriteks rannikulähedastel aladel usaldusväärsete andmete saamiseks. Veepinnalt peegeldunud signaali kuju on võimalik määrata Browni mudeli järgi (vt Joonis 1.3) (Amarouche, et al., 2004).

Olulisemateks parameetriteks lainekuju määramisel on satelliidi kõrgus veepinnast, olulise laine kõrgus ehk SWH (*Significant wave height*) ning tagasipeegeldumise koefitsient (σ) (Wang & Ichikawa, 2017). Tagasipeegeldumise koefitsient on omakorda seotud antenni veast ξ . Epohh τ on kõvera keskpunkt ning selle väärtuse abil leitakse signaali eeldatav viivitusae (Amarouche, et al., 2004). Viivitusaja järgi saab leida aja, mis kulus signaalil mõõdetava pinnani ning tagasi satelliidini jõudmiseks. SWH tähistab esimese merega kokkupuute punkti. Ξ on impulsi viimase osa kalle ning see tähistab antenni viga ehk kõrvalekallet nadiirist (Amarouche, et al., 2004). Kui veepind on sile, on signaali esiserva kalle järsem. Kui veepind lainetab, siis signaal põrkub ühelt laineharjalt teisele ning lainekuju esiserva kalle on sujuvam (vt Joonis 1.4).



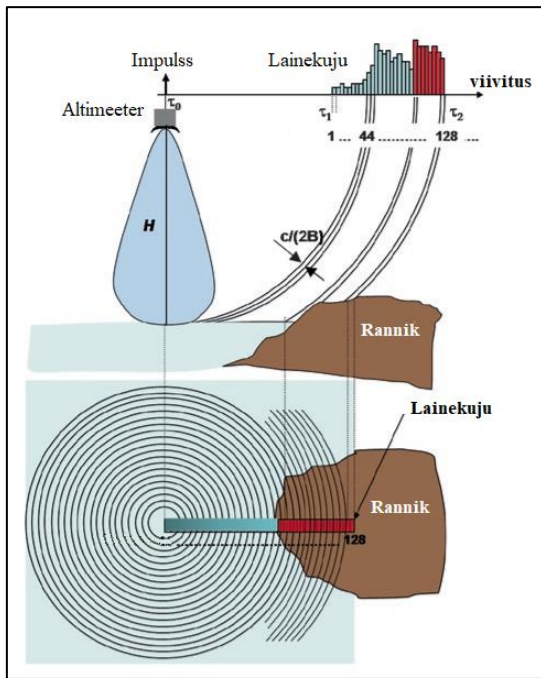
Joonis 1.3. Tagasipeegeldunud signaali kuju määramine Browni mudeli järgi. (Amarouche, et al., (2010) põhjal)



Joonis 1.4. Altimeetria lainekuju moodustumise erinevused (a)sileda, (b)lainetava veepinna korral. (Halimi, 2013)

Joonisel 1.4 on lisaks siledalt ja lainetavalt veepinnalt peegeldunud signaali lainekuju erinevustele välja toodud ka lainekuju tekkimise etapid. Esimene etapp tähistab signaali õhus liikumist veepinna suunas, teine etapp esimest kokkupuudet veepinnaga, kolmas etapp tagasi peegeldumist ning neljas antenni veast tulenevalt signaali langust (Halimi, 2013).

Radar-altimeetri jalajälje suurus veepinnal on oluliseks teadmiseks, et mõista mida on altimeetriaga võimalik jälgida ning mõõta (Rosmorduc, et al., 2018). Jalajälje suurus sõltub satelliidi kõrgusest, mõõdetava pinna kaldest ja ebaühtlusest (Chelton, et al., 2001). Jalajälje suurus reguleeritakse impulsi kestusaja ja analüüsi akna laiussega ning jalajälje suurus jääb enamasti 2-7 km vahele (Fenoglio, et al., 2011). Rannikule lähemale jõudes on välja saadetud signaal mõjutatud maapinnast ning tekib olukord, kus pool jalajäljest satub veepinnale ning teine pool maapinnale (vt Joonis 1.5).



Joonis 1.5. Ranniku mõju signaalikujule iseloomustav joonis. (Fenoglio, et al., (2011) põhjal)

Nagu joonisel 1.5 näha, siis saadud lainekuju punane osa ei jälgi enam Browni mudeli järgset teoreetilist lainekuju. Juhul, kui rannikualad on vähem peegeldavad kui veepind ehk $\sigma_{\text{maa}} < \sigma_{\text{vesi}}$, siis on ranniku mõju lainekujule väiksem ning tuleb esile alles väga ranniku lähedal. Ent kui rannikualad on paremini peegelduvad ehk $\sigma_{\text{maa}} > \sigma_{\text{vesi}}$ (nt korallrihvide alad), siis isegi väike ala võib olulisel määral lainekuju mõjutada. (Fenoglio, et al., 2011)

1.3. Satelliitaltimeetria missioonid

Satelliitaltimeetria missioonide arengu alguseks võib pidada eelnevalt mainitud Williamsdowni seminari 1969. aastal (Stammer & Cazenave, 2017). Seminaril kogutud analüüside ning soovitude tulemusel hakati 70ndatel ning 80ndatel arendama üha täpsemaid satelliitaltimeetria süsteeme (Stammer & Cazenave, 2017).

Skylab (1973-1974) oli ameeriklaste esimene eksperimentaalne kosmosejaam, mis andis esimesed tulemused merepinna undulatsiooni kohta (Stammer & Cazenave, 2017). Selle tulemusena pandi sama radartechnoloogia, mis Skylabil oli *Geodynamic Experimental Ocean Satellite* ehk **GEOS 3** (1975-1979) satelliidile ning tehti veel täpsustavaid altimeetrisi mõõtmisi nagu vahemaade mõõtmisi ning satelliidi kõrguse määramisi kasutades laser retroreflektorit satelliidi pardal (Stammer & Cazenave, 2017). Need mõõtmised kinnitasid

katsetatud altimeetria süsteemide sobivust geoidi ja okeanograafiliste parameetrite mõõtmiseks ning lisaks ka altimeetria sobivust maa- ning jääpinna mõõtmisteks (Stammer & Cazenave, 2017).

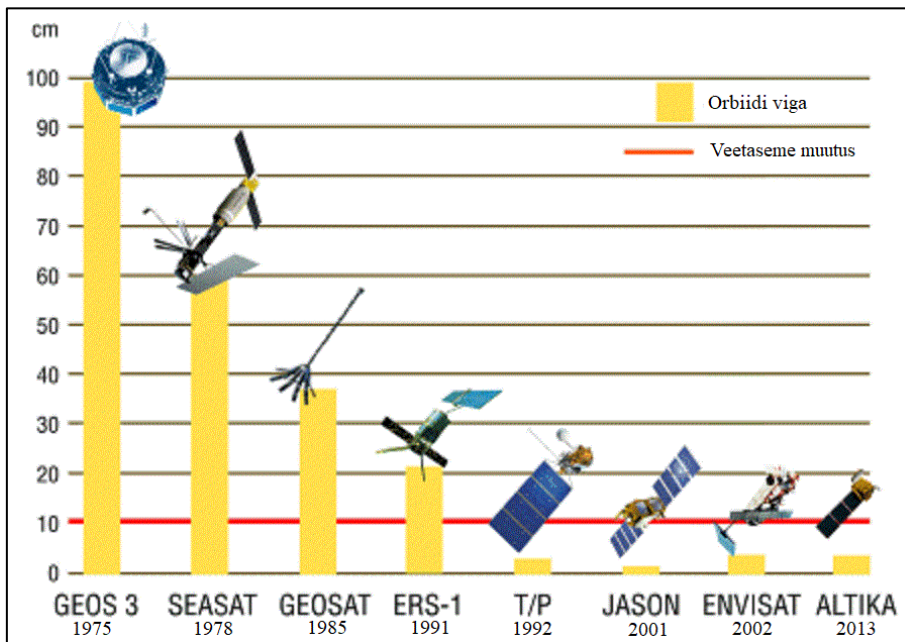
1978. aastal saatis NASA orbiidile uue generatsiooni satelliidi **Seasat** (*SEAfaring SATellite*), mis pälvis tähelepanu oma andmete kvaliteedi ja kättesaadavuse tõttu. Neid andmeid oli teadlastel võimalik vabalt kasutada üle kogu maailma (Stammer & Cazenave, 2017).

1980ndate ainsaks orbiidile saadetud satelliidiks oli **Geosat** (*GEOdetic SATellite*), mille esmaseks ülesandeks oli mere geoidi mõõtmine USA mereväe jaoks, ent lisaks eelnevale tegi see mõõtmisi ka mere seisundi ning tuulte kohta. Geosat satelliidi missiooni pikkuseks oli 18 kuud ning peale seda paigutati ta 17-päevase kordusega orbiidile, kus ta edastas altimeetria andmeid veel üle kolme aasta. Seetõttu võib öelda, et Geosat oli esimene missioon, mis pakkus pikaajalisi kõrge kvaliteediga altimeetria andmeid. (ESA; CNESb, n.d.)

1991. aastal saatis ESA (*European Space Agency*) orbiidile Euroopa kaugseiresatelliidi **ERS-1** (*European Remote-Sensing Satellite*) (ESA, 2015). 1992. aastal saadeti orbiidile **TOPEX/Poseidon**, mis oli NASA, U.S kosmose agentuuri ning CNES (*pr k Centre National D'études Spatiales*) ühendatud satelliitmissioon (Kramer, s.a.). Mõlemad missioonid pakkusid olulist teavet pidevalt kasvavale rahvusvahelisele kasutajaskonnale (ESA; CNESc, n.d.).

2000ndatel toimus läbimurre, kui orbiidile saadeti **Jason-1** (2001) ning **EnviSat** (*Environmental Satellite*) (2002), mida võib pidada uuteks satelliitaltimeetria teerajajateks (ESA; CNESc, n.d.). Välja oli töötatud uus satelliitide juhtimise ja andmetöötluse kontseptsioon, tänu millele oli mõõtmisandmed saada põhimõtteliselt reaalajas (*NRT-Near Real Time*) (AVISOh, n.d.). Satelliitaltimeetria arengu 70ndatest kuni 2000ndate alguseni võtab kokku Joonis 1.6. Punase joonega on kujutatud veetaseme muutus ning kollaste tulpadena POD (*Precise Orbit Determination*) väärtust ehk täpse orbiidi määramise viga (Stammer & Cazenave, 2017). Kui esimeste satelliitide puhul oli võimalik täpne orbiit määrata 1 m täpsusega, siis alates TOPEX/Poseidoni orbiidile saatmisega täpsus tõusis, saavutades isegi mõne sentimeetri täpsuse (Stammer & Cazenave, 2017).

2019. aastal on töös 6 altimeetria missiooni: Jason-2, Saral, CryoSat-2, HY-2, Jason-3 ning Sentinel-3 (vt Tabel 1.2).



Joonis 1.6. Erinevate satelliitltimeetria missioonide täpsete orbiitide määramise (POD väärtus) areng. (Stammer ja Cazenave (2017) põhjal)

Tabel 1.2. Ülevaade hetkel, 2019. aastal töös olevatest satelliitaltimeetria missioonidest (ESA; CNESd, (n.d.);National Satellite Ocean Application Service,(2013) põhjal)

Missiooni nimi	Haldaja	Orbiidile saatmise kuupäev	Kõrgus (km)	Altimeetri tüüp	Sagedus	Korduvus	Ülelendude arv tsükli jooksul	Inklinatsiooninurk (°)
Jason-2	CNES, NASA, Eumetsa, NOAA (<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>)	20.06.2008	1336	Poseidon-3	Ku ja C	10 päeva	254	66
Saral	ISRO (<i>Indian Space Research Organization</i>), CNES	25.02.2015	800	AltiKa	Ka	35 päeva	1002	92
CryoSat-2	ESA	08.04.2010	717	SIRAL	Ku	369 päeva	-	92
HY-2A	Hiina	16.08.2011	I pool 971/ II pool 963	Radar Altimeeter (RA)	Ku ja C	I pool 14/ II pool 168 päeva	-	99,3
HY-2B								
Jason-3	CNES, NASA, Eumetsa, NOAA	17.02.2016	1336	Poseidon-3	Ku ja C	10 päeva	254	66
Sentinel-3A	ESA	16.02.2015	814	SRAL	Ku ja C	27 päeva	~770	98,5
Sentinel-3B								

Kuuest satelliitmissioonist kahte haldab ESA, ühte Hiina, ühte India ning Jason missioone haldavad kollektiivselt CNES, NASA, Eumetsa ja NOAA. Jason-2 ja Jason-3 on eelnimetatud satelliitidest kõige lühema tsükliga, 10 päeva (vt Tabel 1.2). See tähendab, et satelliidid jõuavad iga 10 päeva tagant samasse kohta tagasi. Lühikese tsükli tagab satelliitide küllaltki kõrgel paiknemine, 1336 km kõrgusel. Kõige pikema tsükliga satelliidiks on aga CryoSat-2, millel kulub ühe tsükli tegemiseks koguni 369 päeva (vt Tabel 1.2). Iga satelliitmissioon kasutab erinevat tüüpi altimeetrit (vt Tabel 1.2). Samas on valdavaks kasutatavateks sageduste tüüpideks Ku ning C (vt Tabel 1.2). Ülelendude arv tsükli jooksul on mõjutatud tsükli pikkusest. Mida pikem on tsükkel, seda rohkem jõuab satelliit teha ka ülelende. Nt Saral satelliit jõuab teha 35 päevaga 1002 ülelendu, samas Jason satelliidid 10 päevaga 254 ülelendu (vt Tabel 1.2). Satelliitide orbiitide inklinatsiooninurgad varieeruvad 66-st kraadist 99,3 kraadini (vt Tabel 1.2).

Eelnimetatud missioonidest kahe missiooni raames on orbiidile saadetud 2 identset satelliiti. Sentinel-3 missiooni kuuluvad Sentinel-3A ning Sentinel-3B ja HY-2 missiooni HY-2A ning HY-2B. A ja B versioonid satelliitidest on mõeldud selleks, et kogu Maa saaks kaetud lühema ajaga ning andmete ruumiline lahutus oleks suurem. Kui Sentinel-3A ruumiline lahutus ekvaatoril on ligikaudu 104 km, siis A ja B satelliidi korral on see 52 km (ESA, 2017). Läänemere piirkonnas on Sentinel-3 ruumiliseks lahutuseks A ja B satelliidi korral ligikaudu 27 km.

Lisaks eelnimetatud satelliitidele on lähiaastatesse planeeritud ühine satelliitmissiooni: Jason-CS/Sentinel-6, mis peaks tagama veel parema andmete katvuse USA ning Euroopa kohal (ESA; CNES, n.d.). Järgnevalt on keskendutud Sentinel-3 satelliitmissioonile, mis on üks osa Euroopa Liidu Maa Vaatluse Programmist (*Earth Observation Programme*) Copernicus.

1.4. Copernicuse programm ja Sentinel-3 satelliitmissioon


Sentinel-3 satelliitmissioon on üks osa Euroopa Kosmoseagentuuri (ESA - *European Space Agency*) programmist Copernicus. Copernicus on Euroopa Liidu Maa Vaatluse Programm (*Earth Observation Programme*), mille eesmärk on vaadelda meie planeeti ja keskkonda kõigi Euroopa kodanike heaks (European Commission, 2015). See tähendab, et eesmärgiks on tagada olukord, kus kodanikud oleksid ettevalmistatud ja kaitstud kriiside ning loodus- ja inimtekkeliste katastroofide eest (European Commission, 2015). Copernicuse programmi poolt


kogutavad andmed on mõeldud tsiviilkasutuseks. See tähendab, et suur osa programmi andmeid, analüüse, prognoose ja kaarte on tasuta kättesaadavad ning need on kohandatud kindlate kasutajarühmade vajadustele (European Commission, 2015).


Praeguseks hetkeks on Copernicuse programmi raames orbiidile saadetud 7 satelliiti: Sentinel-1A, Sentinel-1B, Sentinel-2A, Sentinel-2B, Sentinel-3A, Sentinel-3B ja Sentinel-5P (ESAb, n.d.). Esimene orbiidile saadetud satelliit oli Sentinel-1A, 3. aprillil 2014 (ESA, 2014). Iga satelliit on mõeldud erineva eesmärgi täitmiseks (vt Joonis 1.7).


COPERNICUS JA SELLE SENTINELID


Euroopa Maa Vaatluse Programm Copernicus: meie planeedi jälgimine turvalisema maailma nimel


- 


Teatid kui GMES
kuni aastani 2012 -
Global Monitoring for
Environment and
Security
- 


30 avalikku ja
privaatset missiooni
aitavad andmete
kogumisele kassa
- 


16 aastat
kogemusi ja
katsesust
- 


Sentinel-
missioonid
kosmose uuringute
sildamiseks
- 

Tsiviilkaitse Hoiatused
ja kriisiretused
konfliktide ja katastroofi
piirkondades
- 

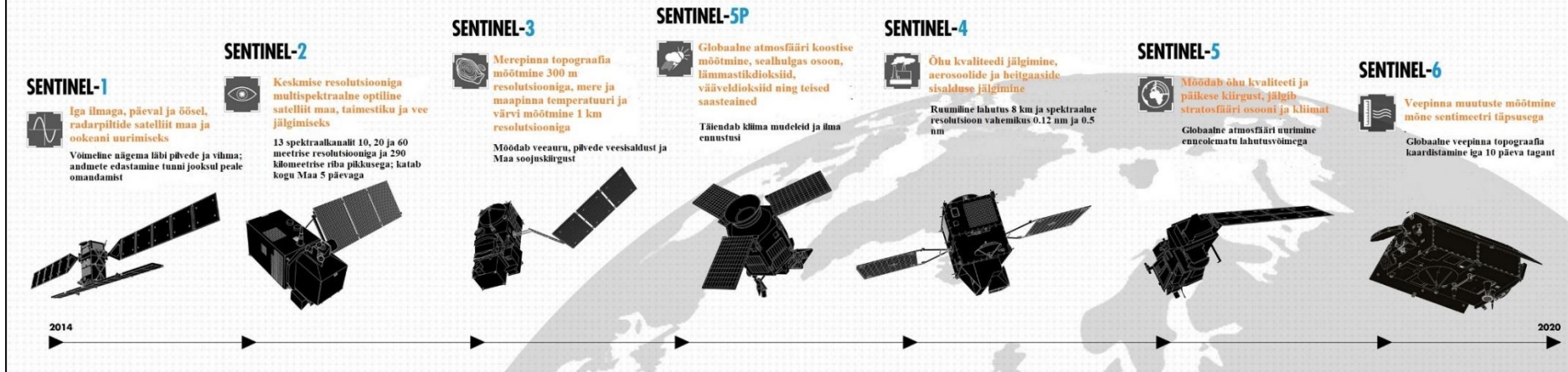
Hädaolukordade
juhtimine. Täpne ja
ajakohane info
plaanide ja pääse
korraldamiseks
- 

Maapinna monitoriing.
Geograafiline info
maade, muutuste ja
linnade arengu kohta
- 

Merekeskkonna monitoriing.
Ookeanide ja merede vaatlused ja
prognoosid
- 

Kliimamuutuste
monitoriing.
Kliimamuutuste, veetõusu ja
sulava jää põhjuste leidmine
- 

Maa atmosfääri monitoriing.
Igapäevane atmosfääri koostise
jälgimine; Sentinel-4 abil iga tunni
järei



Joonis 1.7. Copernicuse programmi koosseisu satelliidid ning nende eesmärgid. (Copernicus (2019) põhjal)

Sentinel-3 missiooni kuuluvad Sentinel-3A ja Sentinel-3B satelliidid, mis saadeti orbiidile vastavalt 16. veebruaril 2016 ning 25. aprillil 2018 (vt Joonis 1.8) (ESAc, n.d.). Missiooni peamiseks eesmärgiks on ookeani seire, ent satelliit kogub infot ka atmosfääri ja maapinna kohta (ESAd, n.d.). Sentinel-3B satelliiti on nimetatud ka Sentinel-3A kaksiksatelliidiks, sest see on täiesti identne oma eelkäijale (ESA, 2018).



Joonis 1.8. Sentinel-3A satelliit orbiidil. Sentinel-3B on oma eelkäijaga identne. (ESAe, n.d.)

Sentinel-3 satelliitmissiooni esmaseks eesmärgiks on veekogude seiramine, kogudes andmeid veepinna topograafia, temperatuuri, värvi ning jääpaksuse kohta (Fernandez, et al., n.d.). Lisaks eelnevale on missioon mõeldud Envisat tüüpi aegridade jätkamiseks Euroopas (Donlon, et al., 2012).

Selleks, et hinnata üleujutuste riske ning majandada paremini veeressurssidega, on Sentinel-3 missioonil ka teisejärguline eesmärk – jõgede ja järvede veetaseme mõõtmine (Donlon, et al., 2012). Vähenevate joogivee varude tõttu, on eriti oluline hinnata mageveekogude ressursse (Drinkwater & Rebhan, 2007). Satelliitaltimeetria kasutamise eelis jõgede ja järvede veetaseme mõõtmisel seisneb just selles, et tihtipeale on ligipääs uuritavale veekogule piiratud. Satelliitaltimeetria puhul toimub aga seire veekogu kohalt, seega füüsilise ligipääsu puudumine ei ole takistavaks argumendiks.

1.4.1. Sentinel-3 parameetrid

Sentinel-3A ja Sentinel-3B satelliitide orbiidid ja kõik parameetrid on identsed. Satelliidi mass on ligikaudu 1150 kg ning mõõtmed 3,9 m x 2,2 m x 2,21 m (ESAf, n.d.). Satelliidi elueaks on määratud 7,5 aastat, ent koos mõningate lisavarustustega võib eluiga ulatuda kuni 12 aastani (ESAg, n.d.).

Sentinel-3 missioon on pardal olevate instrumentide alusel jagatud kaheks: optiline missioon ning pinna topograafia missioon (Bonekamp, et al., 2016). Optilise missiooni alla kuuluvad OLCI instrument ehk ookeani ja maapinna värviinstrument ning SLSTR ehk mere- ja maapinna temperatuuri radiomeeter (*Sea and Land Surface Temperature Radiometer*) (vt Joonis 1.9) (ESAh, n.d.). Pinna topograafia mõõtmiseks on SRAL ehk *Synthetic Aperture Radar Altimeter* ning mikrolaine radiomeeter (*Microwave Radiometer*) (vt Joonis 1.9) (Instrument payload, s.a.; Bonekamp, et al., 2016). Radar-altimeeter on K_u (13,575 GHz) ning C (5,41 GHz) sagedusel nadiiri suunas vaatav altimeeter, mis koos SAR (*Synthetic Aperture Radar*) liidesega võimaldab mõõta nii madala (7 km), kui ka kõrge (300 m) resolutsiooniga (Borde, et al., 2010). Mikrolaine radiomeeter on kasutusel radar-altimeetri töövõime parandamiseks. See tähendab, et mikrolaine radiomeeter mõõdab niiskuse taset atmosfääris, mille abil parandada radar-altimeetri tulemusi (ESAh, n.d.). Täpseks orbiidipõhiseks asukoha määramiseks on hulk seadmeid (GNSS, DORIS-*Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite*, LRR-*Laser Retro Reflector*), mis omavahel moodustavad nõ asukoha kindlaksmääramise paketi (vt Joonis 1.9) (ESAh, n.d.).



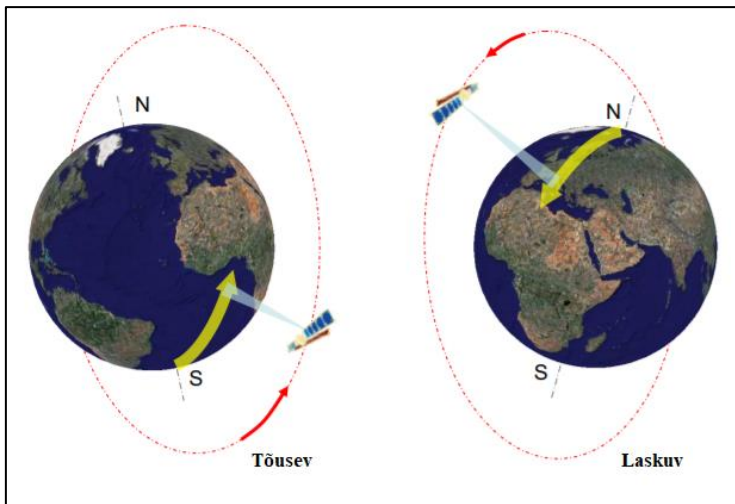
Joonis 1.9. Sentinel-3 satelliitmissiooni satelliitide pardal olevad instrumendid. (ESAh, (n.d.) põhjal)

Sentinel-3 satelliitmissiooni orbiit on sarnane Envisat missiooni orbiidile, tänu millele on võimalik Sentinel-3 andmetega jätkata Envisat aegridasid. Satelliitide orbiit on suure inklinatsiooninurgaga ($98,65^\circ$), mis tagab seiramise ka kõrgematel laiuskraadidel. Orbiit on päikese-sünkroonne, mis tähendab, et orbiidil on pind alati valgustatud sama päikese nurga all. Ekvaatori ületamine toimub kell 10.00 keskmise lokaalse päikeseenergia aja järgi. (ESAi, n.d.)

Orbiidi tsüklik on 27 päeva, mis tähendab, et satelliit on iga 27 päeva järel ühes ja samas kohas (ESAi, n.d.). Ühe tsükli jooksul ehk 27 päevaga läbib satelliit 385 orbiiti. Iga orbiit on jagatud laskuvaks (*descending*) ning tõusvaks (*ascending*). Laskuv orbiit tähendab satelliidi liikumist põhjast lõunasse ning tõusev orbiit liikumist lõunast põhja (vt Joonis 1.10) (Bateson, et al., 2009).

Sentinel-3 satelliidid teevad täpselt 2 korda rohkem ülelende, kui läbivad orbiite. See tähendab, et ühe orbiidi läbimine on jagatud laskuvaks ja tõusvaks ülelennuks ning kui orbiidi alustades on ülelennu numbriks 1, siis orbiit lõpetatakse ülelennuga number 2.

Orbiidi absoluutseks kõrguseks on 814,5 km (Fernandez, et al., n.d.). Sentinel-3A ja Sentinel-3B orbiidi tasandid on 140° nihkega (Fernandez, et al., n.d.). Joonisel 2.1 on näha Sentinel-3A (punasega) ja Sentinel-3B (rohelisega) trajektoorid ning orbiitide numbrid Eesti kohal.



Joonis 1.10. Illustratsioon tõusvast (*ascending*) ja langevast (*descending*) orbiidist. (Bateson, Novali, & Cooksley, (2009) põhjal)

1.5. Rannikulähedase satelliitlõimeetria valideerimine

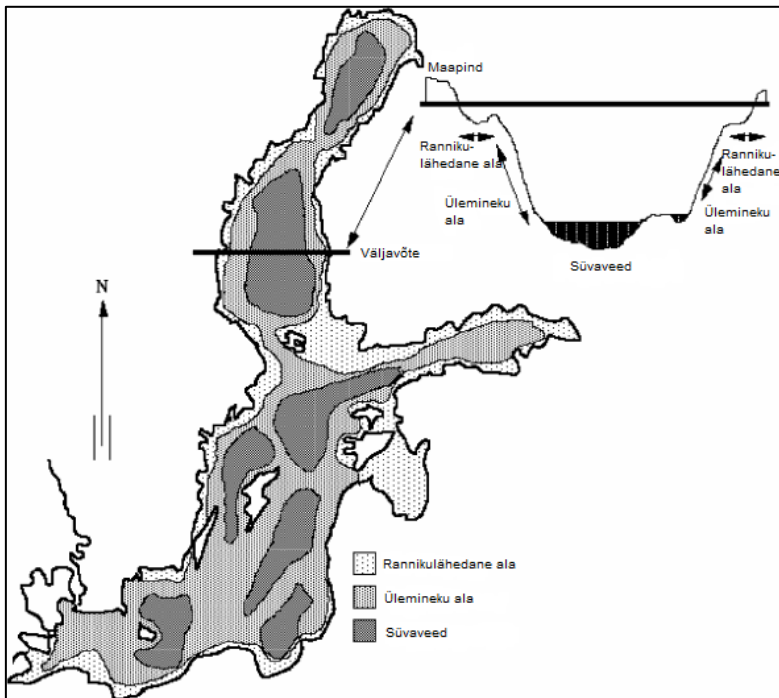
Rannikulähedased alad ning sealsed veetaseme muutused mõjutavad kõige enam rannikuid ning seal elavaid inimesi. Seega on väga oluline suuta täpselt määrata veetaseme muutusi rannikualadel, sest enam kui 600 miljonit inimest ehk ligikaudu 10-% maailma elanikkonnast elab rannikualadel, kus maapinna kõrgus jääb alla 10 meetri ning ligikaudu 2,4 miljardit inimest (40% elanikkonnast) elab kuni 100 km kaugusel rannikust. (United Nations, 2017).

Ajavahemikul 1901-2010 on merevee tase tõusnud kiirenevalt, saavutades aastaks 2800 maksimum kiiruse. Meretaseme tõus toob endaga kaasa aga rannikualade erosiooni, üleujutused, merevee tungimise jõgede süsteemi ning mageveevarude reostumise mereveega. Ligi kaks kolmandikku linnadest, kus elab rohkem kui 5 miljonit inimest, asuvad piirkondades, mis on mõjutatud merevee taseme tõusust. See tähendab, et merevee taseme tõusust tulenev võimalik kahju, ei ole mitte ainult rahaline, vaid seab ohtu 50% elanikkonnast. (United Nations, 2017)

Altimeetria mõistes on rannikulähedaste alade piiritlemine keeruline. See tähendab, et tõmmata ühtset joont rannikulähedase ala ja avaookeani või avamere vahele ei pruugi olla üheselt defineeritud.

Rannikulähedaste alade kaardistamine on keeruline ning erinevate valdkondade teadlased lähenevad sellele ka erinevalt. Rannikulähedast ala on võimalik defineerida erinevate

parameetrite alusel. Joonisel 1.11 on üks võimalikest viisidest, kus Läänemeri on jagatud kolme erinevasse tsooni: rannikulähedane ala, ülemineku ala ja süvaveed.



Joonis 1.11. Läänemeri jagatud kolme tsooni: rannikulähedane ala, ülemineku ala ja süvaveed. (Håkanson ja Bryhn (2008) põhjal)

Viimase kolme aastakümne jooksul on satelliitaltmeetria väga hästi kohandatud avaookeani ja avamere struktuuride vaatlemiseks ning kõrgusandmete kogumiseks, kujunedes sealjuures hindamatuks andmeallikaks (Pascual, et al., 2010; Fu, et al., 2010). Seevastu rannikulähedaste alade altimeetria andmed oma ebatäpsuse tõttu nii laialdast kasutust ei leia. Rannikulähedaste altimeetria andmete ebatäpsus on tingitud halvast ruumilisest ja ajalisest lahutusvõimest (Gómez-Enri, et al., 2019), maapinna topograafia mõjust signaalile, mõnede geofüüsikaliste parandite ebatäpsusest veetaseme kiirest muutusest (Birol, et al., 2017) ning altimeetria jalajäljest veepinnal (Rosmorduc, et al., 2018).

Sellest tulenevalt on rannikulähedase altimeetria täpsuse tõstmine olnud viimaste aastate peamiseks ülesandeks (Cipollini, et al., 2010). Eesmärgi saavutamiseks ei nõua mitte ainult paremaid instrumente ja andmete töötlemise meetodeid, vaid olulisel kohal on ka valideerimismeetodite loomine ja väljatöötamine, et paremini hinnata geofüüsikalistest omadustest tulenevaid parandeid (Palacz, et al., 2017).

Valideerimine oma olemuselt tähendab andmete õigsuse kontrollimist. Altimeetria andmete valideerimine võib vastavalt uurimisobjektile toimuda avamerel, rannikulähedastel aladel, jõgedel või järvedel. Satelliitaltimeetria andmete valideerimise võimalusi on mitmeid. Valideerimiseks võib kasutada veemõõdujaamasid (Ruiz Etcheverry, et al., 2015), GPS poisid (Cheng, 2004), geoidi mudeleid (Ellmann, et al., 2018), katamaraane (Bonfond, et al., 2003), konvoimasinaid (Schröder, et al., 2017) ning neid kõiki saab ka omavahel kombineerida. Samuti võib valideerimiseks kasutada globaalsete loodete ja lokaalsete veemuutuste mudelid (Gómez-Enri, et al., 2019). Kuna uurimistöös on valideerimiseks kasutatud veemõõdujaamasid, merel teostatud GNSS mõõtmisi ning kohalikku geoidi mudelit, on tabelisse 1.3 koondatud tulemused erinevatest uurimustest rannikulähedaste altimeetria andmete valideerimisest kasutades nimetatud meetodeid.

Tabel 1.3. Rannikulähedaste satelliitaltimeetria andmete valideerimise tulemused erinevate uurimistöode põhjal kasutades valideerimiseks veemõõdujaamasid, geoidi mudelit ning GPS poisid

Kasutatud andmed	Uurimis piirkond	Saavutatud täpsus
AVISO võrgustatud mudel, veemõõdujaam ¹	Mar del Plata, Argentiina	18 aastase aegrea põhjal RMSD 0,050 m.
CryoSat-2 parandatud andmed (<i>standard corrections</i>), 22 veemõõdujaama ²	Norra rannik	Standardhälve ranniku lähedal > 0,2 m, avatud ookeani suunas < 0,09 m
ERS-2 kuni SARAL altimeetria andmed, 7 veemõõdujaama ³	Prantsusmaa edelaosas	RMSD väärtus varieerus sõltuvalt satelliidist 0,12 – 1,4 m
TOPEX/Poseidon altimeetria andmed, GPS poi ⁴	Michigan, Holland	Erinevus altimeetria ja GPS mõõtmiste vahel 0,054 ± 0,169 m
Võrgustatud päevane SLA mudel, 5 veemõõdujaama, aja periood 1993-2015 ⁵	Läänemeri, Poola	Veetaseme muutuse trendi erinevus vahemikus 0,001 - 0,0025 m/a
AVISO ühendatud altimeetria andmete mudel, 3 veemõõdujaama ⁶	Türgi edela rannik	RMS väärtus altimeetria andmete ja veemõõdujaama andmete võrdluses vahemikus 0,036 – 0,038 m
Sentinel-3A altimeetria andmed, EST-GEOID-2011 ⁷	Soome laht	RMSE väärtust altimeetria andmete ja EST-GEOID-2011 mudeli võrdluses 0,07 m
Jason-1 ja Jason-2 altimeetria andmed, GPS mõõtmised mööda trajektoori ⁸	Issyk-Kul'i järv	Absoluutne viga vastavalt 0,096±0,04 m ja 0,162±0,042 m

¹ (Ruiz Etcheverry, et al., 2015)

² (Andersen, et al., 2018)

³ (Lan Vu, et al., 2018)

⁴ (Cheng, 2004)

⁵ (Pajak & Kowalczyk, 2019)

⁶ (Yildiz, et al., 2013)

⁷ (Ellmann, et al., 2018)

⁸ (Cretaux, et al., 2011)

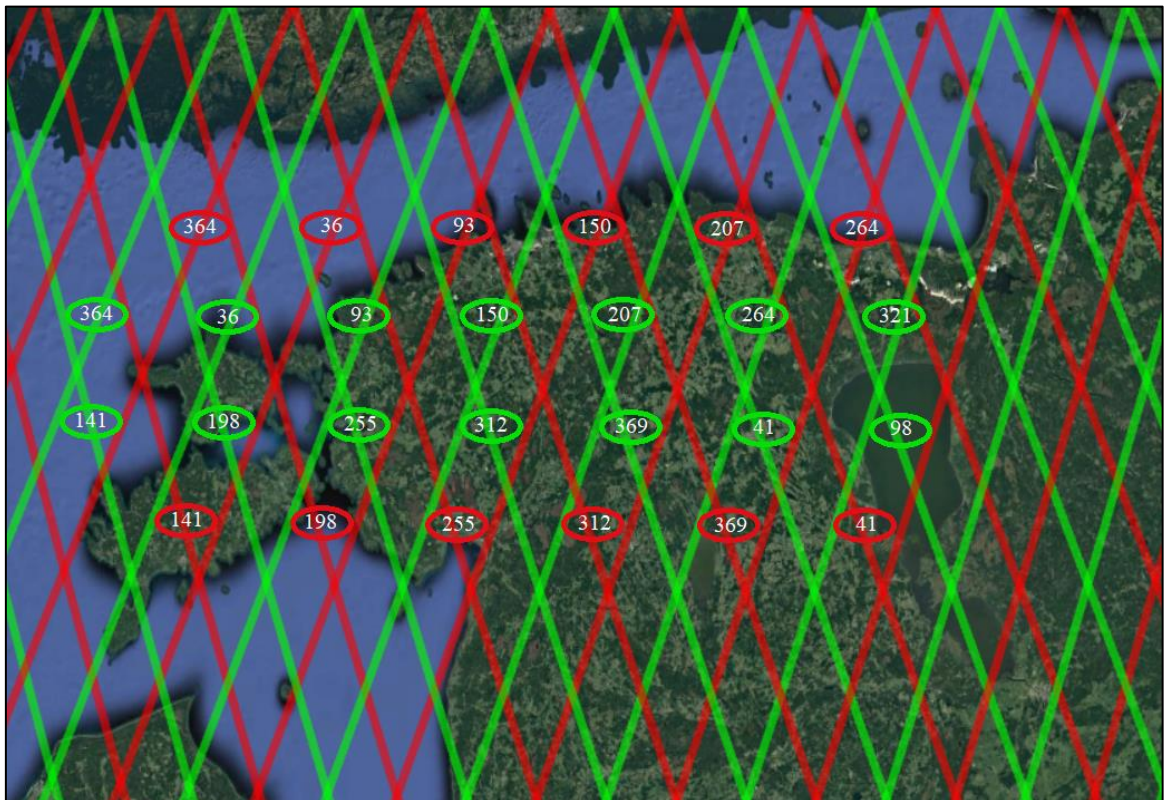
Nagu tabelis 1.3 näha, on valideerimisel saavutatud täpsused väga erinevad. Siinkohal tuleb aga silmas pidada, et saavutatud täpsused ei ole omavahel võrreldavad, kuna valideerimistel on kasutatud erinevaid satelliitmissioone ning valideerimised on toimunud erinevatel kaugustel rannikust. Kõik tabelis kajastatud satelliidid on küll mõeldud veepinna mõõtmiseks, ent kõik neist ei ole projekteeritud rannikulähedaste alade mõõtmiseks. Sentinel-3 satelliitide SRAL instrumendi abil on võimalik täpsed andmed saada ka rannikulähedastel aladel (Fernandez, et al., n.d.). Ellmann, et al., (2018) on kasutanud NTC (*Non Time Critical*) andmeid ning saanud Sentinel-3A täpsuseks Soome lahes kuni 5 km kaugusel rannikust 0,07 m (RMSE-*Root-Mean-Square Error*). Antud uurimistöös on kasutatud samuti NTC andmeid ning valideerimine toimus kuni 5,4 km kaugusel rannikust.

Seetõttu on Ellmann, et al., (2018) tulemused kõige enam võrreldavad käesoleva töö tulemustega. Kõik tabelis esitatud tulemused annavad edasi tõdemust, et altimeetria andmete kasutamine rannikulähedastel aladel on problemaatiline.

2. MATERJAL JA METOODIKA

2.1. Uurimistöö objekt

Magistritöö eesmärgiks on satelliidi Sentinel-3A ja Sentinel-3B valideerimine Läänemere rannikualadel. Joonisel 2.1 on välja toodud Sentinel-3A ja Sentinel-3B orbiitide trajektoorid ja orbiitide numbrid Läänemere piirkonnas. Uurimisobjekt hõlmab kolme punkti Läänemeres, millest üks asub Sentinel-3A trajektooril (*Stop*), üks Sentinel-3B trajektooril (*Sart*) ning kolmas kahe trajektoori ristumisel (*Validation*) (vt Joonis 2.2).



Joonis 2.1. Uurimistöös kasutatavate Sentinel-3A (punane) ja Sentinel-3B (roheline) ülelendude trajektoorid.

Valideerimiseks valiti Sentinel-3A orbiit numbriga 36 (laskuv) ning Sentinel-3B orbiit numbriga 255 (tõusev) (vt Joonis 2.2). Valideerimispunktid jäävad joonise 2.2 järgi rannikulähedasse alasse, kus *Start* punkt on lähimast maismaast ligikaudu 2,8 kilomeetri, *Validation* punkt 5,4 kilomeetri ning *Stop* punkt 3,4 kilomeetri kaugusel.



Joonis 2.2. Satelliitlõimeetria andmete valideerimiseks planeeritud marsruut Läänemeres ning punktide kaugused lähimast maismaast. Punasega on tähistatud Sentinel-3A ülelennu trajektoor ning rohelisega Sentinel-3B trajektoor, ühikud kilomeetrites.

Altimeetria andmete valideerimiseks teostati merel mõõtmised väikelaevaga nii mööda nimetatud trajektoore kui ka igas valideerimispunktis (*Start*, *Validation* ja *Stop*) eraldi. Järgnevalt on kirjeldatud tööprotsessi valideerimiseks kasutatud andmete kogumisest.

2.2. Välitööd ja andmete eeltöötlus

Altimeetria andmete valideerimiseks on vaja määrata absoluutne veetase Sentinel-3A ja Sentinel-3B satelliidi ülelennutrajektoorigil. Absoluutse veetaseme saamiseks rannikust eemal merel on kaks võimalust: (i) teostada GNSS mõõtmised merel või (ii) kasutada geoidimudelit. Antud töös kasutati mõlemat meetodit.

GNSS meetodi korral on oluline valida mõõtmisteks võimalikult tuulevaikne ilm, et vähendada lainetusest tekkivat müra ja suurendada mõõtmiste täpsust. Sentinel-3A ja Sentinel-3B valideerimiseks vajalikke välitööd trajektooreid 36 ja 255 hakati planeerima 2018. a aprillist ning sobiv tuulevaikne ilm saabus alles augustikuus. Läänemere väga muutlikust seisundist tulenevalt ei langenud mõõtmiste päev ning satelliidi ülelennu päev

kokku. Valideerimise jaoks vajalikud GNSS mõõtmised toimusid 16.08.2018 ning need viisid läbi Eesti Maaülikooli õppejõud Aive Liibusk ning Kristina Türk.

GNSS mõõtmistega merel on võimalik määrata veetaseme absoluutne kõrgus, ent kui rannikule on paigaldatud veemõõdujaam ja selle aegread on seotud GNSS mõõtmistega, siis saab rannikujaama andmeid aluseks võttes valideerida altimeetria väärtusi ka peale otseseid GNSS mõõtmisi. Alljärgnevalt on kirjeldatud GNSS mõõtmisi rannikul ja merel, GNSS mõõtmiste sidumist veemõõdulatiga, Dirhami veemõõdujaama ning altimeetria andmete kogumist.

2.2.1. GNSS baaspunkti koordineerimine

Mõõtmised merel teostati kinemaatilisel meetodil. Kinemaatilisel meetodil mõõtmiseks on vaja tagada liikuvjaama üheaegne mõõtmine staatiliselt mõõtva statsionaarse baasjaamaga, mille abil saab hilisema andmetöötluse käigus merel mõõdetud punktidele täpsed koordinaadid arvutada. Koordinaatide arvutamiseks peab baasjaam olema koordineeritud. Selleks paigaldati Dirhami sadama kaile asfaldinael ning sellele tsentreeriti statiivil baasjaam. Baasjaamana kasutati GNSS vastuvõtjat Spectra Precision SP 60 (vt Joonis 2.3).

GNSS vastuvõtja antenni kaldkõrguseks määrati 1,573 m (vt Joonis 2.3) ning see pandi staatiliselt meetodil mõõtma kogu merel mõõtmiste ajaks (10.52-14.48 UTC aja järgi). Peale staatiliselt meetodil mõõtmist määrati baasjaam mõõtma RTK (*Real Time Kinematic*) meetodil, et hilisemal punkti koordinaatide võrdlemisel hinnata nende mõõtmismeetodite täpsust selles piirkonnas (vt Tabel 2.1). Kokku tehti RTK meetodil 346 mõõtmist.



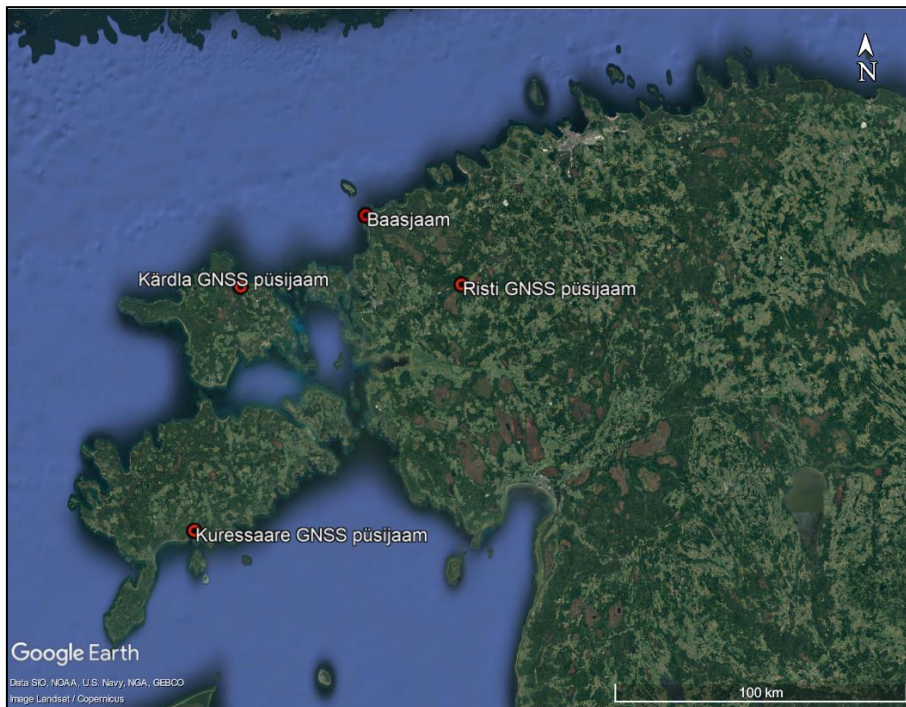
Joonis 2.3. Dirhami sadama kaile paigaldatud GNSS baasjaam Spectra Precision SP60. (Erakogu)

Baaspunktile täpsete koordinaatide arvutamiseks kasutati kolme Trimble VRS Now püsijaama (Risti, Kärkla ja Kuressaare) ning *Trimble Business Center* (TBC) programmi. Kontrolljaamad asuvad baaspunktist linnulennult vastavalt 40, 49 ja 122 km kaugusel (vt Joonis 2.4). Baaspunktile TBC programmis arvutatud koordinaadid on tabelis 2.1.

Tabel 2.1. Erinevate mõõtmistega Dirhami kail asetsevale naelale määratud koordinaadid. Ühikud meetrites

	Staatiline	Augustis RTK meetodil mõõdetud	Novembris RTK meetodil mõõdetud	Nivelleerimine
X	6563616,763*	6563616,754	6563616,773	-
Y	471379,183*	471379,196	471379,181	-
Z	21,877	21,912	21,906	21,909*

*Koordinaadid, mida kasutatakse edasises andmetöötluses



Joonis 2.4. Baasjaamale koordinaatide arvutamiseks kasutatud Trimble VRS Now püsijaamad.

Selleks, et altimeetria väärtusi valideerida ka peale otseseid GNSS mõõtmisi, tuli teostada GNSS mõõtmiste sidumine lähima veemõõdulatiga. See tähendab, et sidudes GNSS mõõtmised veemõõdulati kõrgusega on meil võimalik leida kõrguslik vahe päevase veetaseme ja kinemaatilisel meetodil valideerimispunktis mõõdetud kõrguse vahel ($\Delta GNSS$). Leitud vahe abil saab arvutada valideerimispunkti kõrgused iga ülennu jaoks (vt Joonis 2.7).

2.2.2. Veemõõdulati kõrguslik sidumine

GNSS mõõtmiste kõrguslikuks sidumiseks on kasutatud Dirhami veemõõdulatti (vt Joonis 2.5). Tegemist on 3-meetrise veemõõdulatiga, mille sidus uue kõrgussüsteemiga EH2000 2017. aastal Keskkonnaagentuur (KAUR). Aluseks võeti seinareeper 8190 (vt Joonis 2.7), mis oli eelnevalt uude kõrgussüsteemi viidud. Reeperi kõrguseks oli 5,494 m (EH2000) ning kõrguskasvuks reeperi ja veemõõdulati vahel oli -3,227 m. Seega on Maa-ameti andmetel veemõõdulati kõrguseks 2,219 m (EH2000). Maa-ameti geodeesia kalkulaatori abil teisendades see kõrgus ellipsoidile, tuleb lati kõrguseks 21,941 m (vt Joonis 2.7).



Joonis 2.5. Dirhami veemõõdulatt. (Erakogu)

Keskkonnaagentuuri poolt veemõõdulatile nivelleeritud kõrgust kasutati baaspunktile kõrguse määramiseks. Selleks teostati nivelleerimine baaspunkti ja veemõõdulati vahel (vt Joonis 2.6). Nivelleerimine tehti 2 korda, muutes teisel korral statiivi kõrgust. Nivelleerimise lugemid on välja toodud tabelis 2.2.

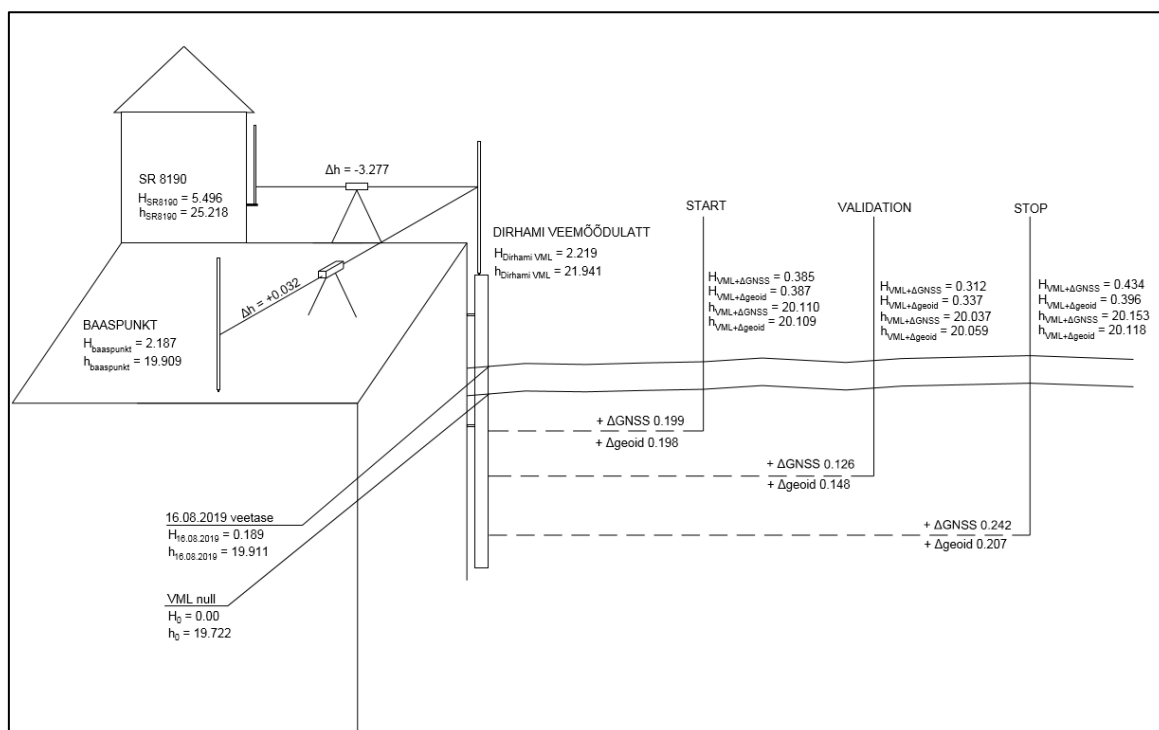


Joonis 2.6. GNSS baasjaama, seinareeperi ja veemõõdulati asukoht Dirhami sadamas.

Tabel 2.2. Dirhami sadamas teostatud nivelleerimise lugemid

	I lugemid	II lugemid
Nael (tagasivaade)	1417	1512
Latt (edasivaade)	1385	1480

Nivelleerimise latilt võetud lugemite põhjal tuli kõrguskasvuks mõlemal juhul +0,032 m. Lahutades kõrguskasv veemõõdulati kõrgusele saame baaspunkti kõrguseks 21,909 m ning seda kõrgust kasutatakse merel kinemaatilisel meetodil mõõdetud punktidele kõrguste arvutamiseks (vt Joonis 2.7). Nivelleerimise tulemusena oleme sidunud GNSS mõõtmised veemõõdulatiga ning meil on võimalik arvutada merepinna kõrgused valideerimispunktidesse iga ülennu jaoks.



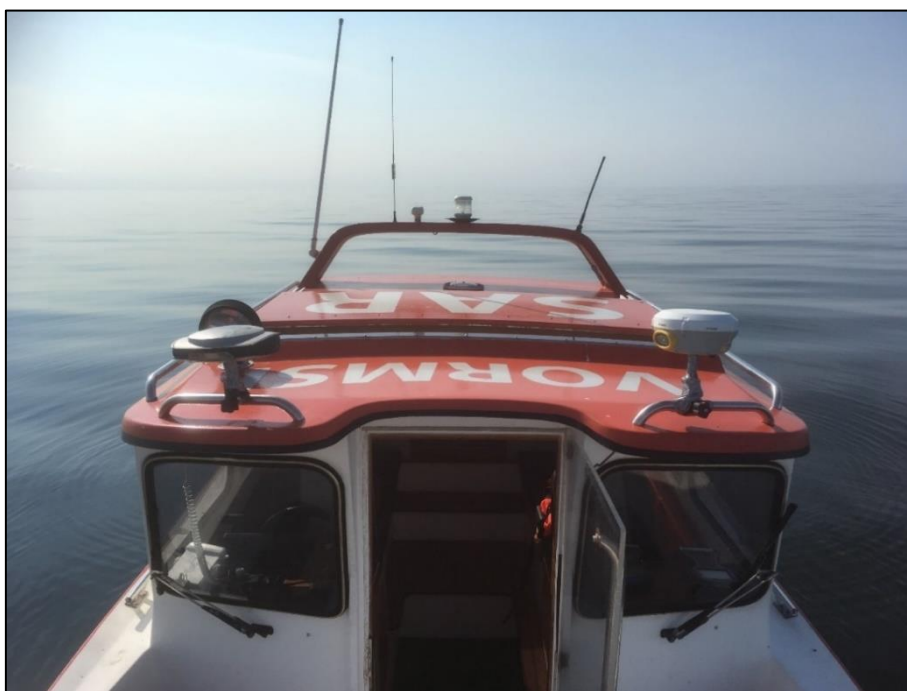
Joonis 2.7. Veemõõdulati sidumine uue kõrgussüsteemiga EH2000 Keskkonnaagentuuri hüdroloogia osakonna poolt 2017. aastal ning GNSS mõõtmiste sidumine veemõõdulatiga. Ühikud meetrites.

Kõrguse veepinnale viimiseks arvestati veemõõdulati lugemit 97 (vt Joonis 2.5 ja Joonis 2.7). See tähendab, et 16. augusti 2018 veetasemeks merel mõõtmiste ajal oli 0,189 m (EH2000) (vt Joonis 2.7). Dirhami rannikujaama poolt mõõdetud veetase samal ajal jääb vahemikku 0,19-0,20 m (EH2000), mis otsustati võrdseks lugeda veemõõdulati päevase veetasemega. Selle tulemusena oleme GNSS mõõtmised kõrguslikult sidunud ka Dirhami rannikujaamaga ning edasises andmetöötlemises kasutatakse Dirhami rannikujaama andmeid.

2.2.3. GNSS mõõtmised väikelaeval

GNSS mõõtmised väikelaeval teostati kolmes valideerimispunktist (*Start*, *Validation* ja *Stop*) ning nende punktide vahelisel trajektoorigil. Mõõtmisi alustati *Start* punktist ja liiguti *Validation* punkti ning *Validation* punktist *Stop* punkti (vt Joonis 2.2). Väikelaeva keskmiseks liikumise kiiruseks oli 40 km/h, mis oli vastavate mõõtmiste tegemiseks kõige optimaalsem. Aeglasemalt või kiiremalt liikudes hakkas laev liialt vee peal hüppama. Laevale oli paigutatud kaks GNSS seadet: Trimble R4-3 ning Spectra Precision SP80 (vt Joonis 2.8).

Vaikimisi määrati vastuvõtjate antennide kõrgusteks väliarvutis 2 m. Tegelikult mõõdeti mõõdulindiga Trimble R4-3 vastuvõtja kõrguseks veepinnast 1,75 m ning Spectra Precision SP80 vastuvõtja kõrguseks 1,70 m (vt Joonis 2.9). See tähendab, et andmetöötleses tuli antennide kõrguste vahedest tulenevad parandid sisse viia. Esimene GNSS vastuvõtja ehk Trimble R4-3 määrati mõõtma kinemaatilisel ning Spectra Precision SP80 RTK (*Real Time Kinematic*) meetodil ehk kinemaatilisel reaajas. RTK meetodil mõõtmiseks kasutati Trimble VRS NOW kontrolljaamade võrku. Mõõtmiste intervalliks oli 1 sekund.



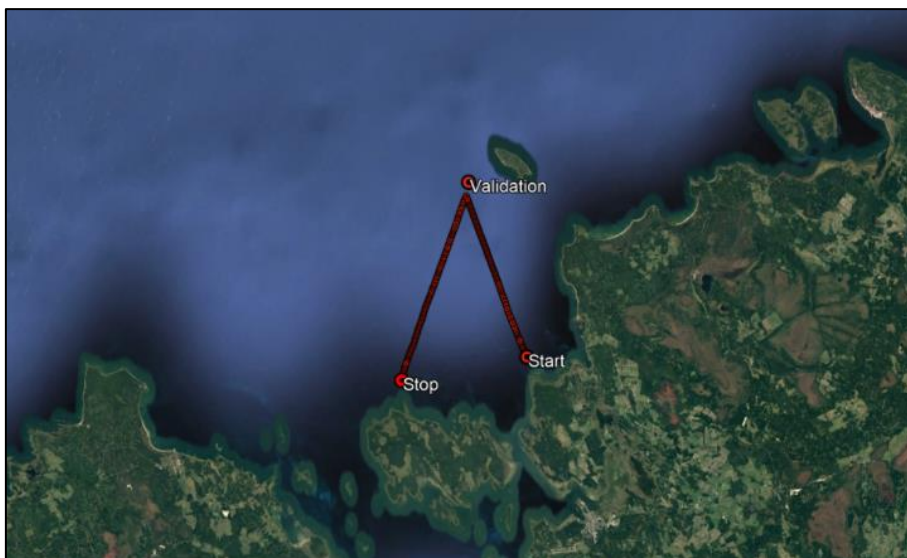
Joonis 2.8. Väikelaevale paigaldatud GNSS vastuvõtjad. Paremal Trimble R4-3 ning vasakul Spectra Precision SP80. (Erakogu)



Joonis 2.9. Väikelaevale kinnitatud antenni kõrguse mõõtmist illustreeriv joonis. (Postimees/Scanpix põhjal)

RTK mõõtmiste tegemine vastuvõtjaga Spectra Precision SP80 põhimõtteliselt ebaõnnestus, kuna juba *Start* punktist *Validation* punkti sõites, kadus Trimble VRS Now püsijaamade võrgu side ära. Katkemise põhjuseks võib pidada Trimble VRS Now võrgu äärealal töötamist ning ligikaudu 44 kilomeetrist vahemaad lähima püsijaamaga. *Validation* punktis seisti paarkümmend minutit ning salvestati andmeid kinemaatilisel meetodil. Peale kinemaatilist mõõtmist katsetati uuesti ühenduse loomist Trimble VRS Now võrguga. Ühendus suudeti luua ning teostati 18 RTK mõõtmist (vt Lisa 1).

Punktist *Validation* punkti *Stop* liikudes jätkati Trimble R4-3-ga kinemaatilisel meetodil mõõtmist. Kokku mõõdeti merel 5756 punkti RTK meetodil, millest 4803 olid *fixed* lahendiga ning ülejäänud *float* lahendiga. Kinemaatilisel meetodil mõõdeti 10580 punkti. Joonisel 2.10 on kujutatud kinemaatiliselt mõõdetud punkte *Start* punktist *Validation* punktini ning *Validation* punktist *Stop* punktini.

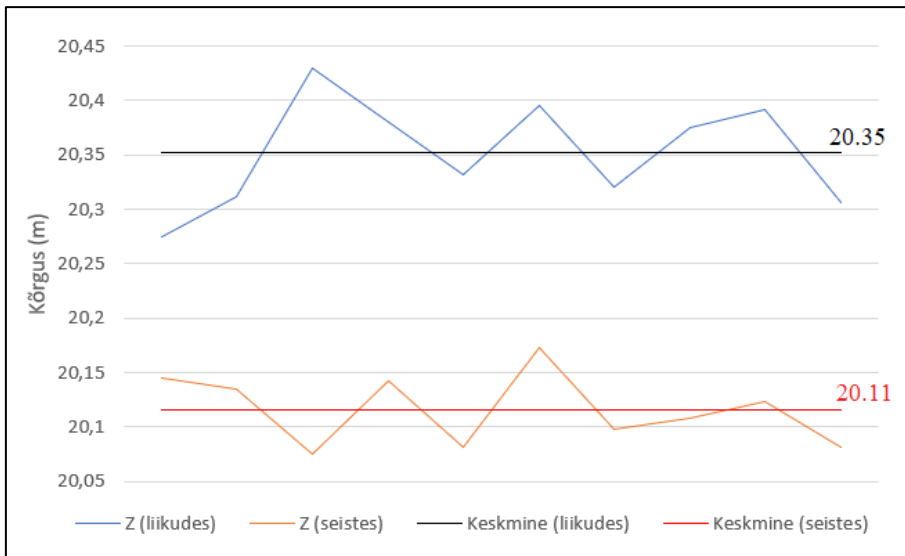


Joonis 2.10. Kinemaatiliselt mõõdetud punktid trajektoiril *Start* → *Validation* → *Stop*.

Selleks, et joonisel 2.10 näidatud punktid oleksid kõrguslikult õiged ning altimeetri andmetega võrreldavad, tuli arvutada laeva liikumiskiirusest tingitud parand ning see mõõdetud kõrgustele juurde lisada.

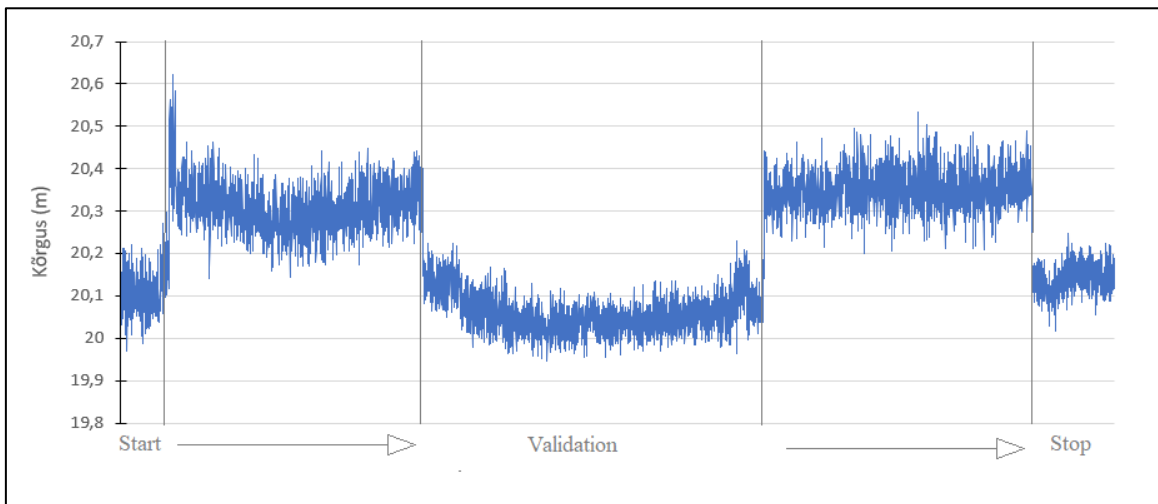
2.2.4. Laeva liikumiskiiruse parandi arvutamine

Väikelaevale on omane, et sõitma hakates tõuseb laeva nina mõnevõrra veest välja. Selleks, et laeva tõus liikumisel ei mõjutaks mõõtmistulemusi, tehti eraldi mõõtmised laeva liikumiskiiruse parandi arvutamiseks. See tähendab, et mõõdeti veepinna kõrgused kindlas kohas nii seistes kui ka 40 km/h liikudes. Andmetöötluse käigus leiti liikuval laeval mõõdetud kõrguste keskmiste ja seisval laeval mõõdetud veepinna kõrguste keskmiste vahe (vt Joonis 2.11).



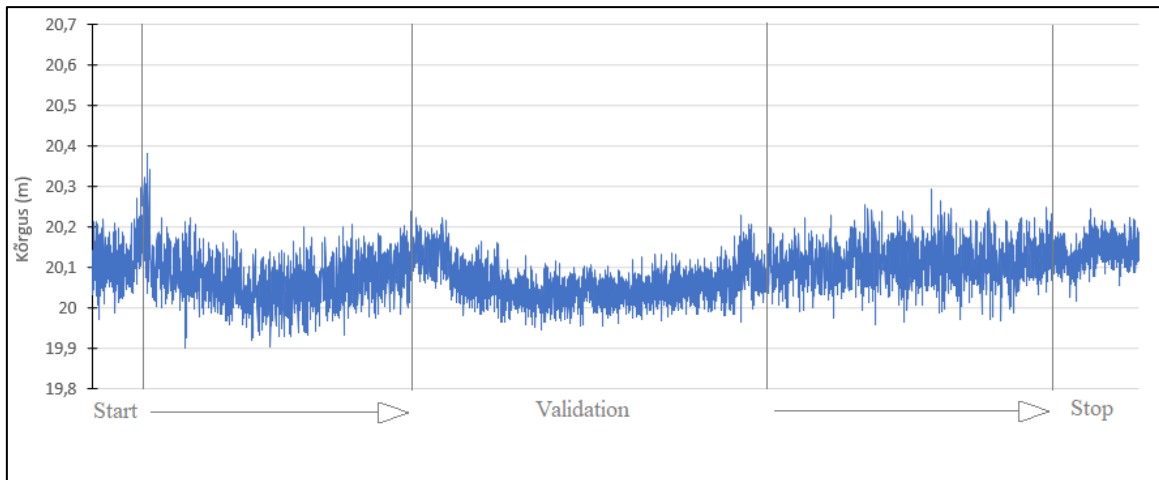
Joonis 2.11. Veetaseme kõrgused ellipsoidist liikuvale ning seisvale väikelaeval mõõdetuna, liikumiskiirusest tingitud parandi leidmiseks.

Arvutatud keskmistest vahe oli 24 cm. See tähendab, et laeva liikudes kiirusel 40 km/h mõõdab GNSS seade kõrgused 24 cm kõrgemad. Seega tuleb kõikidest liikuvale laeval mõõdetud kõrgustest maha lahutada 24 cm. Kõrguslik hüpe väikelaeva liikuma hakkamisel on välja toodud joonisel 2.12. Graafiku järsud hüpped ülesse tähistavad väikelaeva liikuma hakkamist.



Joonis 2.12. Merel mõõdetud veetaseme kõrgused. Hüpped graafikul iseloomustavad väikelaeva liikumiskiiruse muutust.

Joonisel 2.13 on võrdluseks välja toodud liikumiskiirusest tingitud kõrguse parandiga parandatud veetaseme kõrgused trassil *Start* → *Validation* → *Stop*.

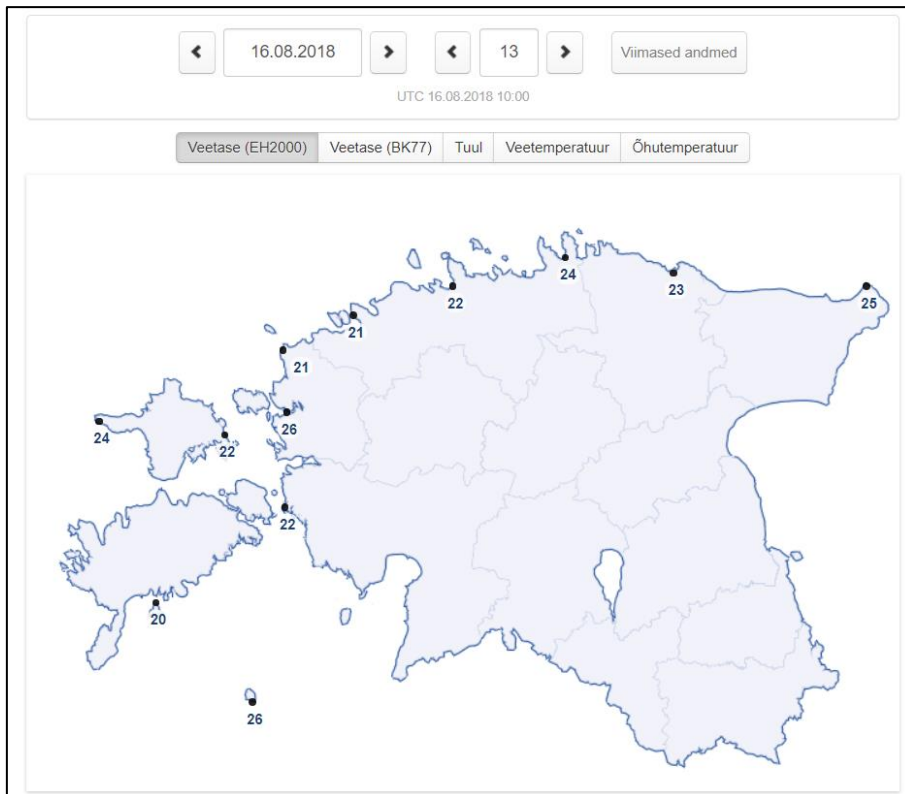


Joonis 2.13. Merel mõõdetud veetaseme kõrgused. Kõrgusi on parandatud laeva liikumiskiiruse parandiga 24 cm.

Nagu joonisel 2.13 näha, siis elimineerib liikumiskiirusest tingitud parand joonisel 2.12 kujutatud kõrguslikud hüpped. Liikumiskiirusest tingitud parand lisatakse nendele kõrgustele, kus laev on saavutanud optimaalse kiiruse ehk 40 km/h. Kiirendustel ja aeglustustel mõõdetud punktidele parandit lisatud ei ole ning neid punkte ei ole kasutatud ka järgnevas andmetöötles.

2.2.5. Dirhami veemõõdujaama andmed

Veemõõdujaamade veetaseme andmed on kättesaadavad Riigi Ilmateenistuse koduleheküljelt (<http://www.ilmateenistus.ee/>) (vt Joonis 2.14). Veetasemed kuvatakse seal 1-tunnise intervalliga ning sentimeetri täpsusega. Kuni 2018. aasta 6. märtsini kuvati veetaseme kõrgused BK77 kõrgussüsteemis ning alates 6. märtsis lisaks ka EH2000 kõrgussüsteemis.



Joonis 2.14. Väljavõte Riigi Ilmateenistuse (www.ilmateenistus.ee) koduleheküljelt veemõõdujaama lugemitest 16.augustil 2018 kell 10 UTC aja järgi.

Antud uurimistöös on altimeetria andmete valideerimiseks kasutatud Dirhami veemõõdujaama andmeid. Jaam alustas meteoroloogiliste vaatlustega juba 1932. aastal ning hüdroloogiliste vaatlustega 1974. aastal. Rannikujaama kõrgus veepinnast on 2,3 m (EH2000). Alates 2010. aastast on jaam automatiseeritud ning 1974.-2003. aastani kandis see hoopis Põõsaspea nime. Dirhami rannikujaam kogub andmeid nii veetaseme, veetemperatuuri, õhutemperatuuri kui ka tuule suuna ja kiiruse kohta. (Riigi Ilmateenistus, n.d.)

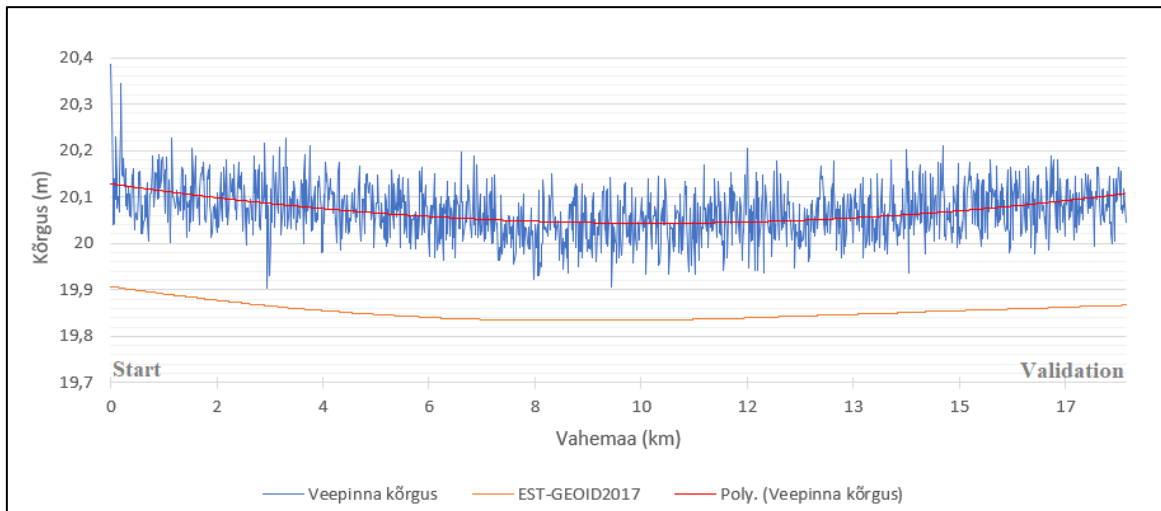
Altimeetria andmete võrdlemiseks leiti veemõõdujaama lugemid iga ülelennu kohta. Sentinel-3A lendab Läänemere kohalt üle 9.25 UTC aja järgi, seega võeti võrdluseks kella 9.00 ja kella 10.00 (UTC aja järgi) lugemite keskmine. Sentinel-3B lendab üle kell 19,27 UTC aja järgi, seega võeti võrdluseks kella 19.00 ja kella 20.00 (UTC aja järgi) lugemite keskmine. Kuna altimeetria kõrgused on arvatud ellipsoidist, siis tuli ka veemõõdujaama kõrgusandmed ümber arvutada ellipsoidile. BK77 kõrgussüsteemis olevad veetaseme kõrgused arvutati esmalt EH2000 kõrgussüsteemi. Kõrgussüsteemide vaheliseks arvutuseks kasutati BK77 ja EH2000 kõrguste ülemineku kalkulaatorit EH2000 kõrgused arvutati

geoidilt ellipsoidile EST-GEOID2017 kalkulaatorit kasutades
(<http://www.maaamet.ee/rr/ymudel/>).

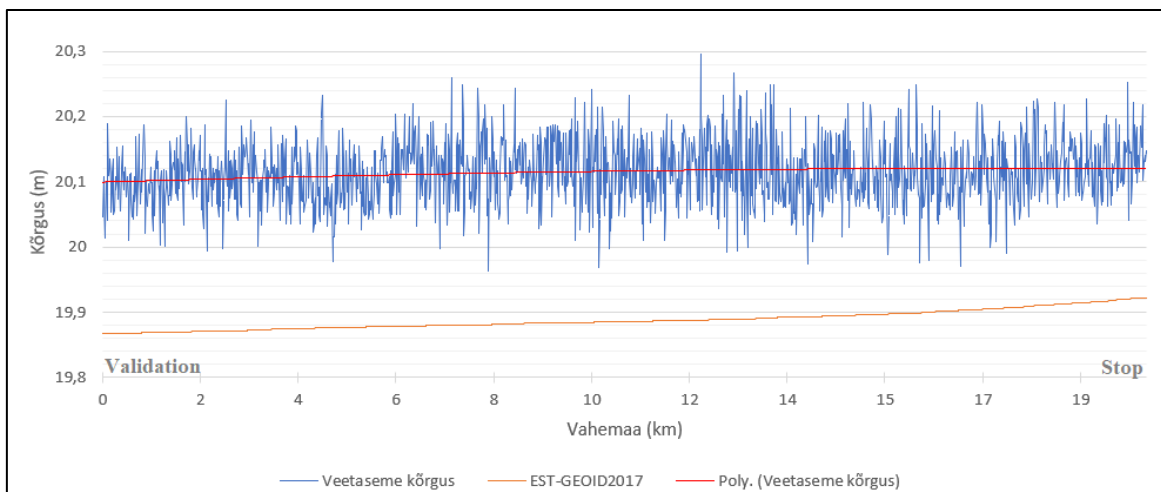
2.3. Merel mõõdetud andmete töötlus

Andmete töötlus algas merel mõõdetud punktidele koordinaatide arvutamisega TBC programmis kasutades baaspunkti koordinaate (vt Tabel 2.1). Tulemustest filtreeriti välja punktid, mis jäid *Start* → *Validation* → *Stop* trajektoorile (vt Joonis 2.10) ning mis olid mõõdetud peale laeva optimaalse kiiruse saavutamist. Eraldi filtreeriti välja valideerimispunktides seisval laeval mõõdetud punktid. Andmete filtreerimise järel liideti eelnevalt arvutatud kõrgustele juurde sisestatud antenni kõrgusest ja reaalsest antenni kõrgusest tulnud erinevused (vt ptk 2.2.4, Joonis 2.9). See tähendab, et kinemaatilisel meetodil mõõdetud punktide kõrgustele liideti juurde 0,25 m ning RTK meetodil mõõdetud punktidele 0,3 m. Lisaks võeti kõrgustest maha laeva liikumiskiirusest tingitud parand ehk lahutati maha 0,24 m (vt ptk 2.2.5).

Eraldi käsitletakse andmeid *Start* punktist *Validation* punktini ning *Validation* punktist *Stop* punktini. Seda just seetõttu, et eraldada Sentinel-3A ja Sentinel-3B trajektooreid. Järgnevatel graafikutel on kujutatud kinemaatilisel meetodil mõõdetud punktide kõrgusi vahemikus *Start* punkt kuni *Validation* punkt (vt Joonis 2.15) ning *Validation* punkt kuni *Stop* punkt (vt Joonis 2.16), mis on programmis TBC tasandatud ning eelnevalt nimetatud paranditega parandatud. Joonisele on lisatud ka mõõtmiste trajektooreil geoidi mudelit iseloomustav joon.



Joonis 2.15. Kinemaatilisel mõõdetud kõrgused lõigul *Start* → *Validation*. Kõrgustesse on sisse viidud antenni vahedest (0,25 m) ning väikelaeva liikumiskiirusest (0,24 m) põhjustatud parandid.

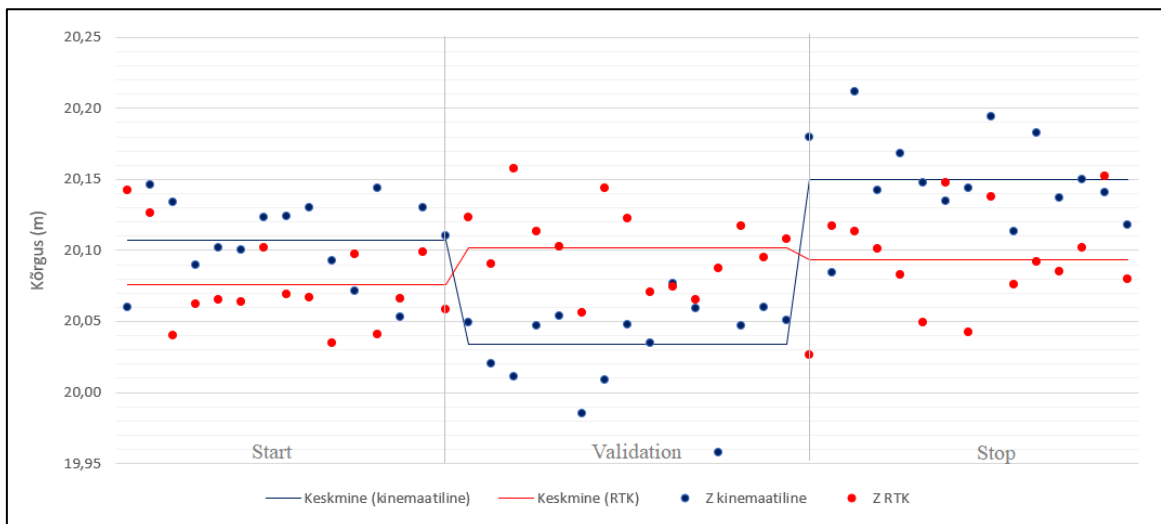


Joonis 2.16. Kinemaatilisel mõõdetud kõrgused lõigul *Validation* → *Stop*. Kõrgustesse on sisse viidud antenni vahedest (0,25 m) ning väikelaeva liikumiskiirusest (0,24 m) põhjustatud parandid.

Joonisel 2.15 ja joonisel 2.16 on näha, et veetaseme kõrgused trajektooridel varieeruvad $\pm 0,1$ m ning kohati on näha ka suuremaid hüppeid. Sellegi poolest jälgivad mõõtmistulemuste 2. astme polünoomilised trendijooned küllaltki hästi EST-GEOID2017 pinda nendel trajektooridel. Visuaalse vaatluse põhjal võib mõõtmistulemustega rahule jääda.

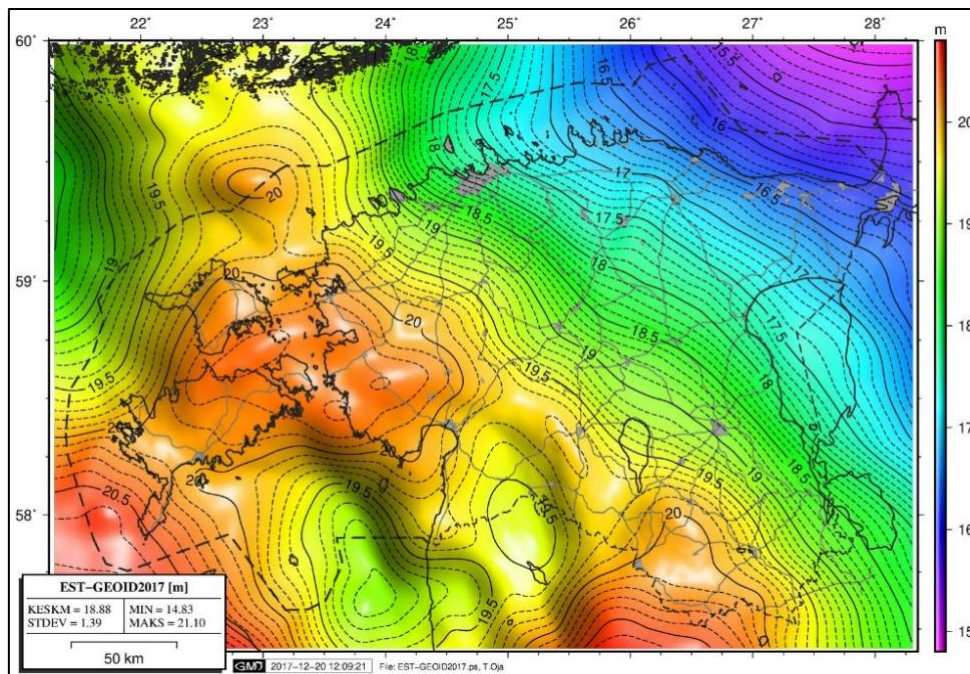
Valideerimispunktides mõõdetud punktide usaldusväärsuse tõstmiseks võrreldi omavahel kinemaatilisel ja RTK meetodil mõõdetud punktide kõrgusi (vt Lisa 1). *Start* ja *Stop* punktis on kasutatud Spectra Precision SP80-ga mõõdetud RTK punkte ning *Validation* punktis Trimble R4-3 vastuvõtjaga mõõdetud RTK punkte. Kõrguste võrdlus nimetatud punktides

on välja toodud joonisel 2.17. Nagu näha, klappivad *Start* punktis kinemaatilised ja RTK punktid omavahel kõige paremini, keskmiste kõrguste erinevus on 0,034 m. *Stop* ja *Validation* punktis on meetodite vahelised erinevused suuremad, *Validation* punktis 0,065 m ja *Stop* punktis 0,059 m. Märkimisväärseks kõrguste erinevuse põhjuseks kahe meetodi vahel võib pidada Osmussaarel oleva piirivalve radari mõju GNSS signaalile ning mõõtmiste teostamist Trimble VRS Now piirialal. Kõige suurem ning vastuolulisem erinevus *Validation* punktis võib olla tingitud sellest, et seal punktis mõõdeti nii kinemaatilisel kui ka RTK meetodil Trimble R4-3 vastuvõtjaga. See tähendab, et mõõtmised ei toimunud samal ajal ning meetodi vahetamisel toimus ka uuesti initsialiseerimine. EST-GEOID2017 mudeli järgi on *Start* ja *Validation* punkti vaheline kõrguste erinevus -0,05 m ning *Validation* ja *Stop* punkti vaheline erinevus +0,06 m. See tähendab, et kinemaatilisel meetodil mõõdetud punktid jälgivad EST-GEOID2017 muutumist *Start* → *Validation* → *Stop* trajektooriga, olgugi et kõrguste muutused on mõnevõrra suuremad, vastavalt -0,07 m ja +0,12 m. 0,12 meetrine muutus *Validation* → *Stop* trassil (kinemaatilisel meetodil) tuleneb 0,06 meetrisest EST-GEOID2017 erinevusest *Validation* ja *Stop* punktide vahel ning 0,022 meetrisest Δ geoid ja Δ GNSS erinevusest *Validation* punktis ning 0,035 meetrisest Δ geoid ja Δ GNSS erinevusest *Stop* punktis (vt Joonis 2.7).



Joonis 2.17. Kinemaatilise ja RTK meetodil mõõdetud veetaseme kõrguste võrdlus *Start*, *Validation* ja *Stop* punktis.

Seega, arvestades EST-GEOID2017 muutumist trajektoiril *Start* → *Validation* → *Stop* (vt Joonis 2.7 ja Joonis 2.18), osutusid usaldusväärsemateks kinemaatilisel meetodil mõõdetud punktid ning neid kõrgusi kasutati ka $\Delta GNSS$ väärtuste leidmiseks.



Joonis 2.18. Geoidi EST-GEOID2017 kõrgused referentsellipsoidist GRS80. Ühikud meetrites. (Maa-Amet)

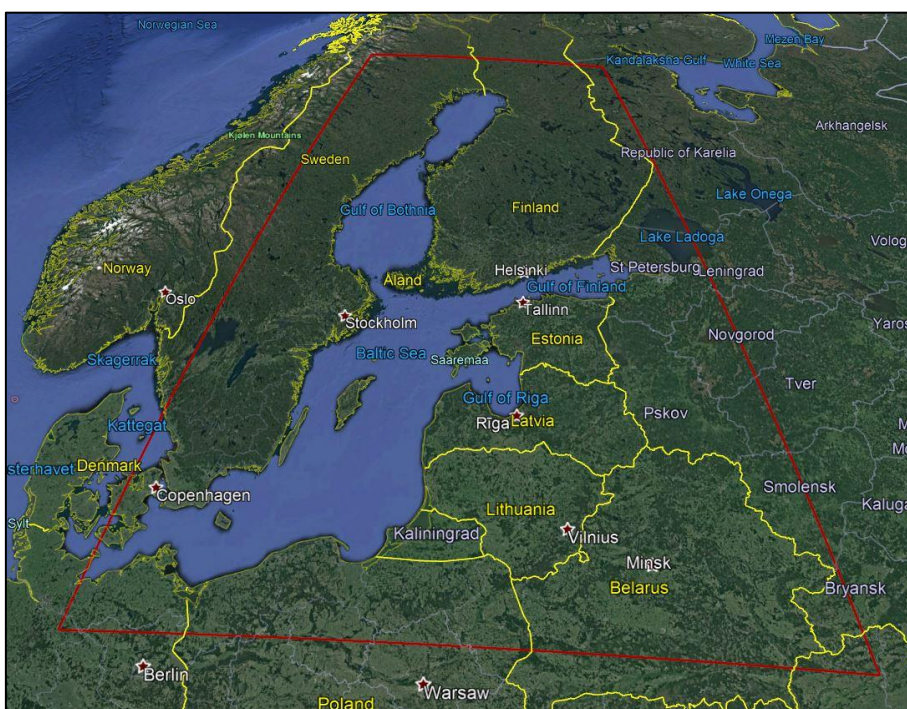
Altimeetria andmete võrdlemiseks veemõõdujaama andmetega liideti ühel juhul veemõõdujaama andmetele juurde EST-GEOID2017 kalle ($\Delta geoid$) (vt Joonis 2.7 ja Joonis 2.18) ning teisel juhul GNSS mõõtmistest saadud parand ($\Delta GNSS$) (vt Joonis 2.7). $\Delta geoid$ leiti nii Dirhami veemõõdujaama ja *Start* punkti, Dirhami veemõõdujaama ja *Validation* punkti kui ka Dirhami veemõõdujaama ja *Stop* punkti vahel. Esimesel juhul oli see 20 cm, teisel juhul 15 cm ning viimasel juhul 21 cm (vt Joonis 2.7). GNSS mõõtmiste parandiks võeti kõrguste vahe, mis saadi mõõdetud veetaseme ja *Start/Validation/Stop* punktis mõõdetud veetaseme kõrguste vahest (vt Joonis 2.7). *Start* punktis tuli $\Delta GNSS$ 20 cm, *Validation* punktis 13 cm ja *Stop* punktis 24 cm. $\Delta GNSS$ ja $\Delta geoid$ väärtuste küllaltki hea kokkulangevus tõestab meile asjaolu, et EST-GEOID2017 täpsus Läänemerele on niivõrd hea, et altimeetria andmete valideerimiseks GNSS mõõtmisi teha ei olekski vaja. See omakorda tagab andmete lihtsama ja kiirema kontrollitavuse.

Lisas 2 on välja toodud tabelid Dirhami veemõõdujaama kõrgustega, millele on lisatud $\Delta GNSS$ ja $\Delta geoid$ parandid. Sentinel-3A altimeetria andmete võrdlustabelid on koostatud aastate kaupa, eristades *Validation* ja *Stop* punkte. Kuna Sentinel-3B altimeetria andmeid

on vaid viie ülelennu kohta, siis on need koondatud kahte tabelisse, eristades *Validation* ja *Start* punkte.

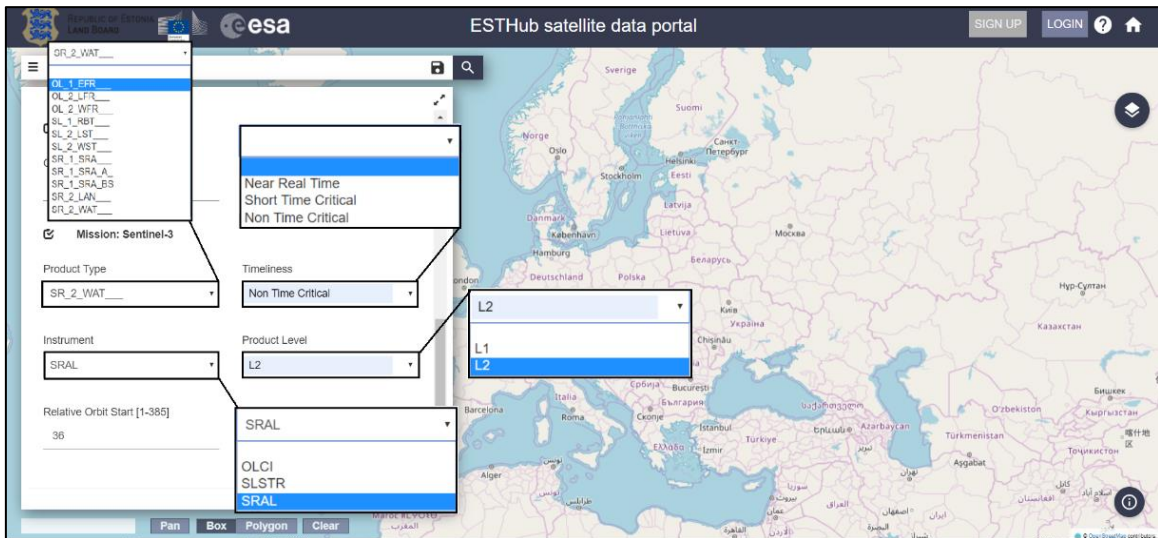
2.4. Altimeetria andmete kogumine

Sentinel-3 altimeetri andmeid on võimalik alla laadida riiklikust altimeetria andmete keskusest EstHUB (ehdatahub.maaamet.ee), kuhu on koondatud Sentinel ja Landsat 8 andmed (Maa-amet, 2019). Sentinel-1, Sentinel-2 ja Landsat 8 andmed on kättesaadavad ligikaudu 200 km ulatuses riigipiirist ning Sentinel-3 andmed kogu Läänemere ja selle lähiümbruse kohta (vt Joonis 2.19) (Maa-amet, 2019).



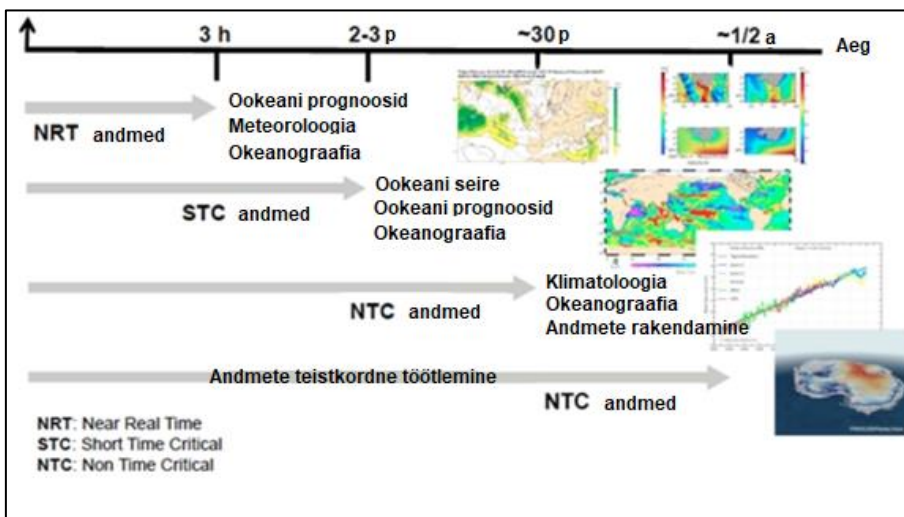
Joonis 2.19. Satelliidi Sentinel-3 andmete ulatus satelliitandmete keskuses ESTHub (märgitud punasega). (Maa-amet)

Andmete alla laadimiseks on mugav andmeportaal, kus on võimalik andmeid otsida nii kindlate kriteeriumit, kui ka kaardil näidatud asukoha järgi. Sentinel-3 andmete otsimiseks, tuleb linnuke märkida vastava missiooni ette (vt Joonis 2.20).



Joonis 2.20. Väljavõtte riiklikust altimeetria andmete andmeportaalist ning Sentinel-3 andmete otsimiseks sisestatavate parameetrite valikus.

Alustades paremast veerust (vt Joonis 2.20), saab valida sobiva andmete edastuse tüübi: NTC (*Non Time Critical*) – andmed on edastatud ligikaudu 1 kuu peale mõõtmisi, NRT (*Near Real-Time*) – andmed on edastatud vähem kui 3 tunni jooksul peale mõõtmisi ning STC (*Slow Time Critical*) – andmed on edastatud 48 tundi peale mõõtmisi (vt Joonis 2.21). NTC andmeid kasutatakse eelkõige klimatoloogias ja okeanograafias, NRT mere meteoroloogia ja ookeani-atmosfääri uurimiseks ning STC andmeid geofüüsikaliste uuringutes ning okeanograafias (vt Joonis 2.21).



Joonis 2.21. Level-2 andmete tüüpide jagunemine nende edastamise kiiruse ning rakenduse järgi. (ESA, (n.d.) põhjal)

Paremas veerus (vt Joonis 2.20) on kuvatud andmete tase, kus valikus on L1 ja L2. L2 tähendab, et andmeid on eelnevalt juba töödeldud ning lõppkasutaja jaoks sobivaks tehtud (ESAk, n.d.). L1 andmed on toorandmed, millele on juurde lisatud instrumendi parandid (ESAI, n.d.)

Vasakus veerus (vt Joonis 2.20) saab määrata andmete tüübi, instrumendi, millega andmeid on mõõdetud ning orbiidi numbri. Andmete tüübi alt on võimalik valida: OL_1_EFR, OL_2_LFR, OL_2_WFR, SL_1_RBT, SL_2_LST, SL_2_WST, SR_1_SRA, SR_1_SRA_A, SR_1_SRA_BS, SR_2_LAN ning SR_2_WAT (vt Joonis 2.20). Andmetüüpide erinevused on lahti seletatud Tabel 2.3. Orbiidi numbri lahtrisse sisestatakse otsitava orbiidi number.

Sobivate parameetrite valimise tulemusena kuvatakse ülelendude failid ning need on võimalik alla laadida. Iga ülelend laetakse alla eraldi kaustana, mis sisaldab kolme NC formaadis faili: vähendatud andmefaili (*reduced_measurement*), standard andmefaili (*standard_measurment*) ning laiendatud andmefaili (*enhanced_measurement*) (vt Joonis 2.22).

Tabel 2.3. Riiklikus altimeetria andmete andmeportaalis valitavad andmete tüübid

Andmetüüp	Instrument	Sisu
OL_1_EFR	OLCI	Täis resolutsiooniga (<i>Full Resolution</i>) ülemise atmosfääri kiirgus ¹
OL_2_LFR	OLCI	Täis resolutsiooniga (<i>Full Resolution</i>) maa ja atmosfääri geofüüsikalised tooted ¹
OL_2_WFR	OLCI	Täis resolutsiooniga (<i>Full Resolution</i>) vee ja atmosfääri geofüüsikalised tooted ¹
SL_1_RBT	SLSTR	Heledus, temperatuur, kiirgus ²
SL_2_LST	SLSTR	Maapinna temperatuuri geofüüsikalised parameetrid ²
SR_1_SRA	SRAL	Müra parameetrid LRM (<i>Low Resolution Mode</i>), PLRM (<i>Pseudo Low Resolution Mode</i>) ja SAR režiimide jaoks (resolutsioon 20Hz) ³
SR_1_SRA_A	SRAL	Müra parameetrid PLRM ja SAR režiimide jaoks (resolutsioon 80Hz) ³
SR_1_SRA_BS	SRAL	Müra parameetrid LRM, PLRM ja SAR režiimi jaoks (resolutsioon 20 Hz), täiendatud SAR eksperdi poolt ³
SR_2_LAN	SRAL	1-Hz ja 20-Hz K _u ja C sageduste parameetrid (LRM/SAR/PLRM), lainekujud; üle maapinna ³
SR_2_WAT	SRAL	1-Hz ja 20-Hz K _u ja C sageduste parameetrid (LRM/SAR/PLRM), lainekujud; üle veepinna ³

¹ (ACRI-ST IPF Team, 2017)

² (ACRI-ST IPF Team, 2018a)

³ (ACRI-ST IPF Team, 2018b)

S3A_SR_2_WAT_20170106T091710_20170106T100516_20180217T101053_2886_013_036	MR1_R_NT_003
S3A_SR_2_WAT_20170202T091712_20170202T100517_20180217T131251_2885_014_036	MR1_R_NT_003
S3A_SR_2_WAT_20170301T091710_20170301T100516_20180217T161417_2886_015_036	MR1_R_NT_003
S3A_SR_2_WAT_20170328T091712_20170328T100518_20180217T191936_2886_016_036	MR1_R_NT_003
S3A_SR_2_WAT_20170424T091715_20170424T100521_20180217T222320_2886_017_036	MR1_R_NT_003
S3A_SR_2_WAT_20170521T091720_20170521T100526_20180218T022516_2886_018_036	MR1_R_NT_003
S3A_SR_2_WAT_20170617T091720_20170617T100525_20180218T043159_2885_019_036	MR1_R_NT_003
S3A_SR_2_WAT_20170714T091717_20170714T100522_20180218T073142_2885_020_036	MR1_R_NT_003
S3A_SR_2_WAT_20170810T091716_20170810T100521_20180218T113153_2885_021_036	MR1_R_NT_003
S3A_SR_2_WAT_20170906T091711_20170906T100516_20180218T133426_2885_022_036	MR1_R_NT_003
S3A_SR_2_WAT_20171003T091715_20171003T100520_20180218T163818_2885_023_036	MR1_R_NT_003
S3A_SR_2_WAT_20171030T091717_20171030T100523_20180218T193954_2886_024_036	MR1_R_NT_003
S3A_SR_2_WAT_20171126T091714_20171126T100520_20180218T224203_2886_025_036	MR1_R_NT_003
S3A_SR_2_WAT_20171223T	
S3A_SR_2_WAT_20180119T	enhanced_measurement.nc 17.02.2018 15:12 NC File 37 365 KB
S3A_SR_2_WAT_20180119T	reduced_measurement.nc 17.02.2018 15:12 NC File 329 KB
S3A_SR_2_WAT_20180215T	standard_measurement.nc 17.02.2018 15:12 NC File 5 323 KB
S3A_SR_2_WAT_20180314T	xfdumanifest.xml 17.02.2018 15:12 XML Document 102 KB

Joonis 2.22. ESTHubist alla laetud ülelendude failide kaustad, mis igäüks sisaldab kolme NC formaadis faili: vähendatud (*reduced*), standard (*standard*) ja laiendatud (*enhanced*) andmefail.

Vähendatud andmefailis on ainult 1 Hz *Ku* sagedusel mõõdetud andmed ning parameetrid. Standard failis on 1 Hz ja 20 Hz, nii *Ku* kui ka *C* sagedusel mõõdetud andmed. Laiendatud andmefail sisaldab kõige rohkem informatsiooni. See sisaldab kõike seda, mis on standard failis ning lisaks veel lainekuju ja sellega seotud parameetreid, mis on vajalikud andmete töötlemiseks. (ESAm, n.d.)

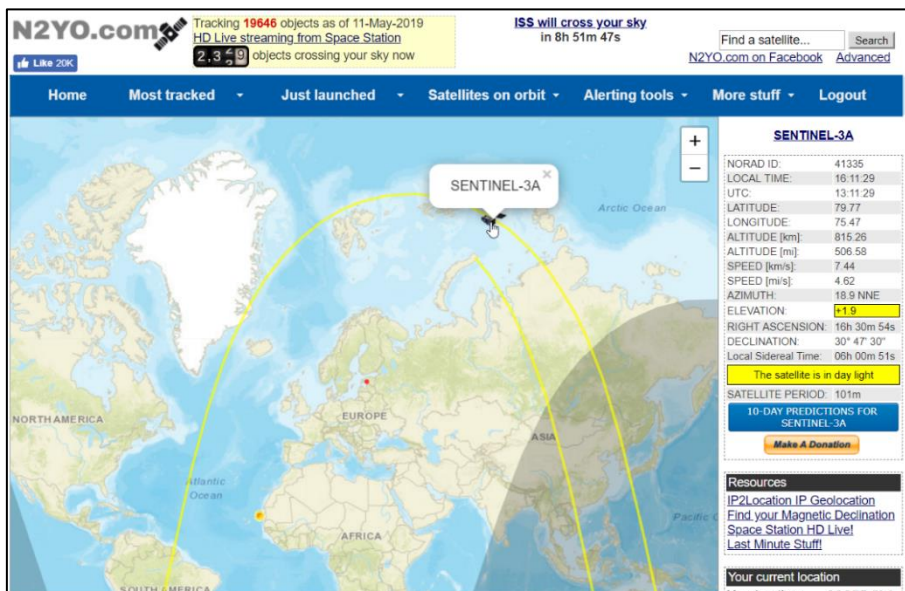
Lisaks ESTHubile on Sentinel-3 andmeid võimalik alla laadida ka AVISO andmebaasist (www.aviso.altimetry.fr), ent arvestada tuleks tähelepanekuga, et ühe ja sama ülelennu L2 andmed erinevast andmebaasist alla laetuna erinevad üksteisest. Erinevus seisneb MSS ning SSHA väärtustes. MSS väärtuste erinevus tuleb erinevate referentsellipsoidide kasutamisest keskmise merepinna arvutamisel ning SSHA/SLA erinevus erinevast arvutuskäigust. AVISOs kasutatakse keskmise merepinna arvutamiseks TOPEX ellipsoidi (AVISOi, n.d.) ning ESTHubis WGS84 ellipsoidi (ESAn, n.d.). Kahe ellipsoidi kõrguslik vahe Läänemeres on ligikaudu 71 cm (Liibus, 2013). Järgnevalt on välja toodud AVISO ja ESTHub SSHA/SLA arvutuskäigud (kättesaadavad programmi BRAT *Operation* aknas), kus erinevused on tähistatud tumedamalt.

SSHA (ESTHub) = satelliidi kõrgus (*altitude of satellite*) – parandatud ookeani altimeetria vahemik (*Ku band corrected ocean altimeter range*) – ionosfääri parand (*altimeter ionospheric correction on Ku band*) – kuiva troposfääri parand (*model dry tropospheric correction*) – märja troposfääri parand (*radiometer wet tropospheric correction*) – mereseisundi parand (*sea state bias correction in Ku band*) – maapinna loodete parand (*solid earth tide height*) – geotsentriline ookeani loodete kõrgus (*geocentric ocean tide*)

height) – geotsentriliste pooluste loodete kõrgus (*geocentric pole tide height*) – **pööratud baromeetri kõrguse parand** (*inverted barometer height correction*) – merepinna topograafia kõrgesageduslik kõikumine (*high frequency fluctuations of the sea surface topography*) – MSS (*mean sea surface*)

SSHA (AVISO) = satelliidi kõrgus (*altitude of satellite*) – parandatud ookeani altimeetria vahemik (*Ku band corrected ocean altimeter range*) – ionosfääri parand (*altimeter ionospheric correction on Ku bänd*) – kuiva troposfääri parand (*model dry tropospheric correction*) – märja troposfääri parand (*radiometer wet tropospheric correction*) – mereseisundi parand (*sea state bias correction in Ku bänd*) – maapinna loodete parand (*solid earth tide height*) – geotsentriline ookeani loodete kõrgus (*geocentric ocean tide height*) – geotsentriliste pooluste loodete kõrgus (*geocentric pole tide height*) – **muutuva atmosfääri parand** (*dynamic atmospheric correction*) – MSS (*mean sea surface*) – **missiooni sisene kõrvalekalle** (*inter mission bias*)

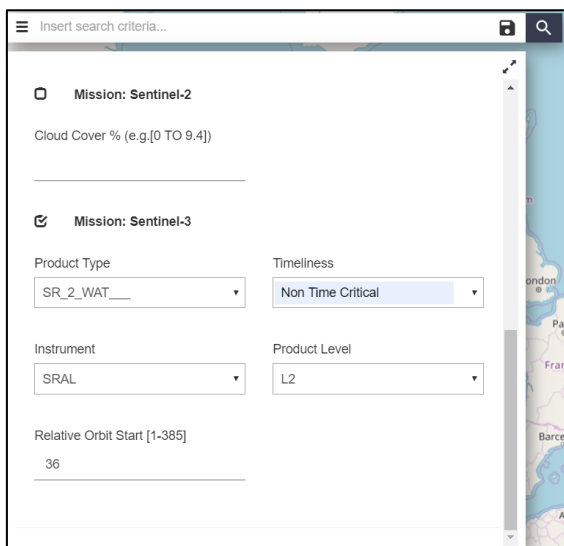
Lisaks andmete alla laadimisele on võimalik Sentinel-3 satelliitide liikumist reaajas jälgida veebileheküljel www.n2yo.com (vt Joonis 2.23). Samuti on võimalik mainitud leheküljel vaadata satelliitide järgneva 10-päeva ülelendusid, mis on abiks satelliidi valideerimismõõtmiste planeerimiseks.



Joonis 2.23. Sentinel-3A reaajas jälgimine (11.05.2019) veebileheküljel www.n2yo.com.

2.4.1. Töös kasutatud altimeetria andmed

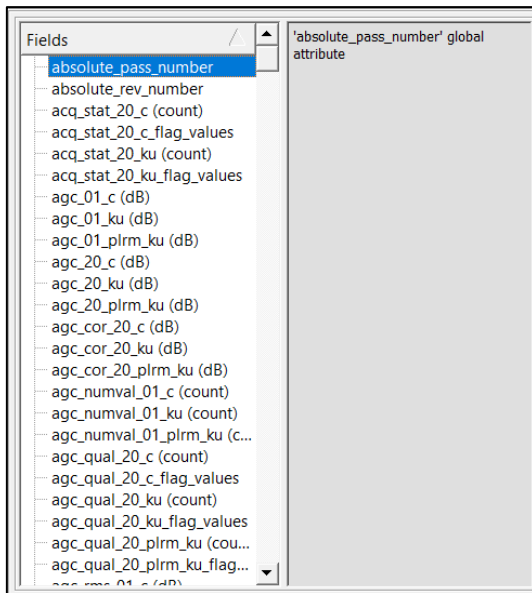
Töös kasutatavad Sentinel-3A ja Sentinel-3B altimeetria andmed on alla laaditud riiklikust satelliitandmete keskusest ESTHub (ehdatahub.maaamet.ee). Alla laaditi kõik Sentinel-3A orbiidi nr 36 andmed ajavahemikul juuni 2016 kuni detsember 2018 ning Sentinel-3B orbiidi 255 viie ülelennu andmed ajavahemikul detsember 2018 kuni märts 2019. Nimetatud ajavahemikke jäi 36 Sentinel-3A ülelennu orbiidil 36 ning 5 Sentinel-3B ülelennu trajektooriga 255. Altimeetria andmete alla laadimisel sisestati joonisel 2.24 välja toodud parameetrid.



The screenshot shows a web interface for searching satellite data. At the top, there is a search bar with the text "Insert search criteria...". Below it, there are two mission filters: "Mission: Sentinel-2" (unchecked) and "Mission: Sentinel-3" (checked). Under "Mission: Sentinel-2", there is a field for "Cloud Cover % (e.g.[0 TO 9.4])" with a horizontal line below it. Under "Mission: Sentinel-3", there are four dropdown menus: "Product Type" set to "SR_2_WAT___", "Timeliness" set to "Non Time Critical", "Instrument" set to "SRAL", and "Product Level" set to "L2". At the bottom, there is a field for "Relative Orbit Start [1-385]" with the value "36" entered.

Joonis 2.24. Väljavõtte riiklikust satelliitandmete keskuses ESTHub (ehdatahub.maaamet.ee). Otsingu keskkonda altimeetria andmete allalaadimiseks sisestatud parameetrid.

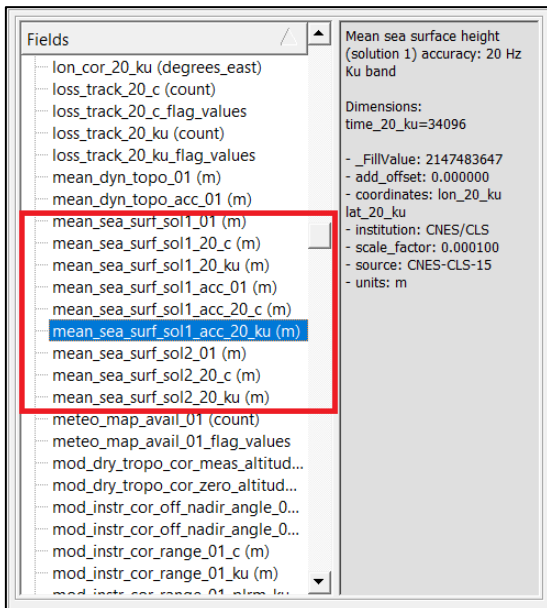
Alla laetakse *Marine Centre* poolt hallatavad SR_2_WAT (uurimisalas identne SR_2_LAN_ andmetega, sest tegu on ranniku lähedase alaga) NTC edastustüüpi failid, mis on kogutud SRAL instrumendiga ning mida on juba lõppkasutaja jaoks sobivaks töödeldud (L2). Lisatud parameetrite tulemusena kuvatakse ülelendude failid ning need on võimalik alla laadida. Iga ülelend laetakse alla eraldi kaustana, mis sisaldab kolme NC formaadis faili. Antud uurimistöös on kasutakse laiendatud (*enchanced*) andmefaili (vt Joonis 2.22). Laiendatud andmefail sisaldab endas 474 kirjet. Joonisel 2.25 on välja toodu vaid osa failis olevast informatsioonist.



Joonis 2.25. Väljavõtte väikesest osast andmetest, mida laiendatud (enchanced) andmefail sisalda.

Altimeetria andmete filtreerimiseks alla laetud laiendatud andmefailidest kasutati programmi BRAT (*The Broadview Radar Altimetry Toolbox*) (vt ptk 2.4.2.). Antud uurimistöös kasutatakse veepinna kõrguste leidmiseks *Mean sea surface* (MSS) ning *Sea surface height anomaly* (SSHA) andmeid ehk siis keskmise merepinna kõrgust ning merepinna kõrgust üle keskmise merepinna.

Keskmise merepinna kõrguse saamiseks oli mitu erinevat võimalust. Esiteks oli võimalik valida sol1 (*mean_sea_surface_sol1*) ja sol2 (*mean_sea_surface_sol2*) vahel (vt Joonis 2.26). Mõlemad väljastavad keskmise veetaseme kõrguse referents ellipsoidist, ent nende erinevus seisneb institutsioonist, kus need arvutatud on. Esimese juhul on tegemist teadusasutusega CNES/CLS (*National Centre for Space Studies/Collected Localisation Satellites*) ning teisel juhul DNSC-ga (*Danish National Space Center*). Lisaks eelnevale on võimalik valida erinevate sageduste vahel (K_u ning C) ning mõõtmistiheduse vahel: 1 Hz või 20 Hz (vt Joonis 2.26). Andmetöötles kasutatakse *mean_sea_surface_sol2_20_ku* andmeid.



Joonis 2.26. Väljavõtte MSS andmete valikust täiendatud andmefailis.

Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna oli võimalik saada kahes erinevas variandis: *ssha_20_ku(m)* ning *ssha_01_ku(m)*. Kuna eelnevalt sai keskmise merepinna kõrguse andmed valitud mõõtmistihedusel 20 Hz ning sagedusel K_u , tuli andmete kokkusobivuse eesmärgil valida *ssha_20_ku(m)*. Lisaks eelnevale on *ssha_20_ku(m)* puhul kasutatud sol2 keskmist merepinna taset, tänu millele sobivad need *mean_sea_surface_sol2_20_ku* andmetega kokku.

Programmis BRAT soovitud andmete välja filtreerimise tulemusena saame igast ülelennust tekstifaili, mis sisaldab mõõdetud punktide pikkus- ja laiuskraade ning valitud MSS ja SSHA kõrgusandmeid (vt Joonis 2.27).

	lat_20_ku (degrees_north)	lon_20_ku (degrees_east)	mean_sea_surf_sol2_20_ku (m)	ssha_20_ku (m)
1				
2	81.426226	100.635977	6.3547	0.071
3	81.426223	100.615975	6.3616	0.008
4	81.426219	100.595974	6.3695	0.099
5	81.426214	100.575979	6.3657	-0.445
6	81.426207	100.555977	6.3647	-1.322
7	81.4262	100.535981	6.3644	-0.895
8	81.426192	100.515985	6.3657	-0.705
9	81.426183	100.49599	6.3556	-1.015
10	81.426172	100.475994	6.3516	-2.063
11	81.426161	100.455998	6.3455	-2.1
12	81.426149	100.436002	6.339	-1.706
13	81.426135	100.416006	6.3361	-1.246
14	81.426121	100.39601	6.3348	-0.089
15	81.426106	100.376015	6.3277	-0.013
16	81.426089	100.356019	6.33	0.059
17	81.426072	100.336019	6.336	0.095
18	81.426054	100.316023	6.3529	0.059
19	81.426034	100.296023	6.364	0.048
20	81.426014	100.276028	6.3843	0.152
21	81.425992	100.256028	6.3834	0.032
22	81.42597	100.236028	6.3879	0.127
23	81.425947	100.216033	6.387	0.003
24	81.425922	100.196033	6.3905	0.14

Joonis 2.27. Väljavõtte tekstfailist, kuhu on programmiga BRAT filtreeritud altimeetria punktide pikkus- ja laiuskraadid, MSS ning SSHA.

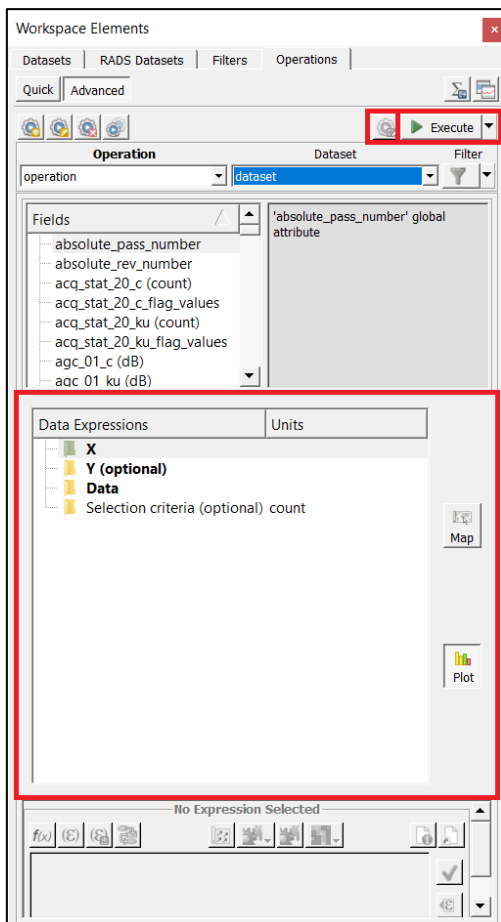
Saadud tekstfaile kasutatakse SSH arvutamiseks valideerimispunktides ning eelnimetatud trajektooridel. Tekstfailide saamisega on kõik valideerimiseks vajalikud andmed kogutud ning järgnevalt on kirjeldatud nende andmete töötlemist.

2.4.2. Programmi BRAT lühitutvustus

BRAT (*Broadview Radar Altimetry Toolbox*) on CLS (*Collecte Localisation Satellites*) poolt välja töötatud tarkvara radar altimeetria andmete töötlemiseks (Benveniste & Picot, 2017). Tarkvara sisaldab endas töövahendeid ning juhiseid kõige levinumate radar altimeetria andmete lugemiseks, töötlemiseks, statistiliseks analüüsiks ning tulemuste visualiseerimiseks (Benveniste & Picot, 2017). Tegemist on vabavaraga, mis töötab nii Windows, MacOSX kui ka Linux põhistel operatsioonisüsteemidel (BRAT development team, 2018). Peamisteks BRAT funktsioonideks on:

- andmete importimine ning kiire esmase vaate loomine;
- andmete eksportimine erinevatesse (netCDF binary, ASCII tekst, GeoTiff+GoogleEarth) formaatidesse, rasterpiltideks salvestamine;
- andmete statistiliste parameetrite arvutamine;
- andmeväljadest kombinatsioonide loomine (kombinatsioone hõlmavate valemite arvutamine);
- valimite koostamine (*resampling*);
- andmete redigeerimine, andmete valimine lihtsate kriteeriumite alusel;
- andmete vahetamine kasutajate vahel;
- tulemuste kuvamine kasutaja määratud eelistustega ja
- satelliitandmete allalaadimine ja sünkroniseerimine RADS (*Radar Altimeter Database*) andmebaasiga (BRAT development team, 2018).

Altimeetria andmete kättesaamiseks (MSS ja SSHA) tuleb programmis esmalt luua uus töölaud (*workspace*) ning selle alla uus andmekogu (*dataset*). Loodud andmekogusse saab importida eelnevalt alla laetud altimeetria andmed, iga fail eraldi andmekogusse. Soovitud andmekirjete kättesaamiseks tuleb luua uus operatsioon (*operations*), valida soovitud andmekirjed ning n õ lohistada need andmete avaldamise (*data expressions*) aknasse (vt Joonis 2.28).



Joonis 2.28. Väljavõtte programmis BRAT olevast andmete avaldamise (*data expressions*) aknast.

Kui sobivad andmekirjed on välja valitud, tuleb vajutada joonisel 2.28 näidatud *Execute* nupule ning seejärel selle kõrval olevale nupule andmete eksportimiseks ASCII tekstfaili formaati.

2.5. Altimeetria andmete töötlus

Altimeetria andmete töötlemiseks tuli filtreeritud andmefailist eraldada andmed *Start*, *Validation* ning *Stop* punktide kohta. Kõigi punktide puhul valiti lähim altimeetria punkt. Kuna satelliidi mõõdetud punktid ei satu igakord täpselt samasse punkti, siis pikkus- ja laiuskraadid ülelendude lõikes varieerusid (vt Tabel 2.4).

Tabel 2.4. Altimeetria punktide pikkus- ja laiuskraadide varieeruvus *Start*, *Validation* ja *Stop* punktides

	<i>Start</i>	<i>Validation</i>	<i>Stop</i>
B_{min}	59,099539	59,255555	59,081085
B_{max}	59,101631	59,258729	59,084213
L_{min}	23,414384	23,288959	23,172598
L_{max}	23,435872	23,330759	23,199062

Mõõdetud veetaseme kõrgus antud punktis arvutati valemiga 2.1 (joonise 1.1 põhjal):

$$SSH_A = MSS_i + SSH_{A_i}, \quad (2.1)$$

kus MSS_i on keskmise merepinna kõrgus ning SSH_{A_i} kõrgus üle keskmise veepinna.

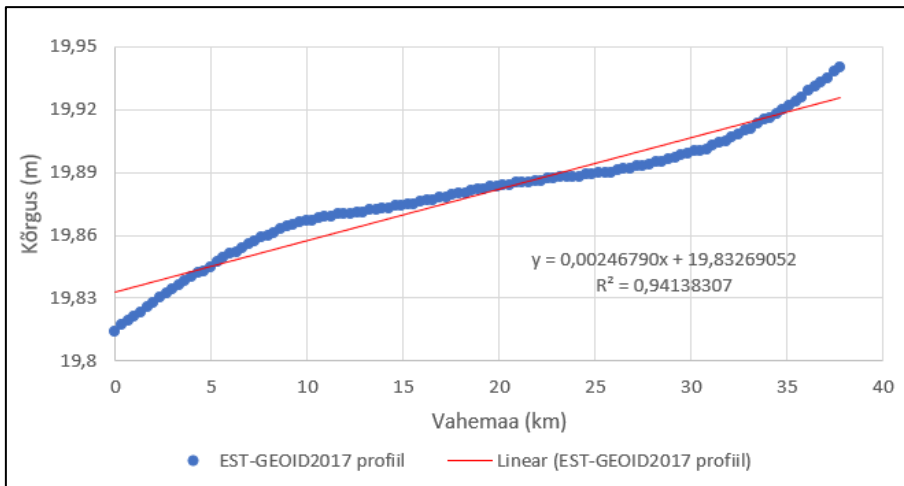
Peale veetaseme kõrguste (SSH_A) arvutamist võrreldi saadud kõrgusi SSH_{geoid} ja SSH_{GNSS} väärtustega (vt Lisa 2). Ilmnesid märkimisväärsed kõrguste erinevused, mille tulemusena otsustati altimeetria andmetes kontrollida erindite olemasolu. Altimeetria andmetest erindite eemaldamiseks on kasutatud kolmekordset kvartiilide vahe (IQF) meetodit, mis avaldub valemiga 2.2:

$$IQF = 3xIQR = 3x(Q_3 - Q_1) \quad (2.2)$$

kus Q_3 on kolmas kvartiil ning Q_1 esimene kvartiil. See tähendab, et igale ülelennule leiti geoidi EST-GEOID2017 profiil ning profiili ja vahemaa kaudu geoidi lineaarne trend (vt Joonis 2.29). Veetaseme kõrguse (SSH_A) ja lineaarse trendi vahena leiti hälve (D_i), millest arvutati alumine (Q_1) ja ülemine (Q_2) kvartiil. IQF väärtust võrreldi hälvete väärtustega ning kui hälbe väärtus oli suuremaks kui IQF väärtus, osutus antud altimeetria punkt erindiks (E_i) (vt valem 2.3).

$$E_i = |D_i| > IQF \quad (2.3)$$

Erindite leidmiseks tehti iga ülelennu jaoks kuni neli iteratsiooni. Iga järgneva iteratsiooni tegemiseks eemaldati eelmise iteratsiooni käigus tekkinud erindid. Juhul, kui juba esimese iteratsiooni jooksul ühtegi erindit ei leitud, siis järgnevate iteratsioonidega ei jätkatud.



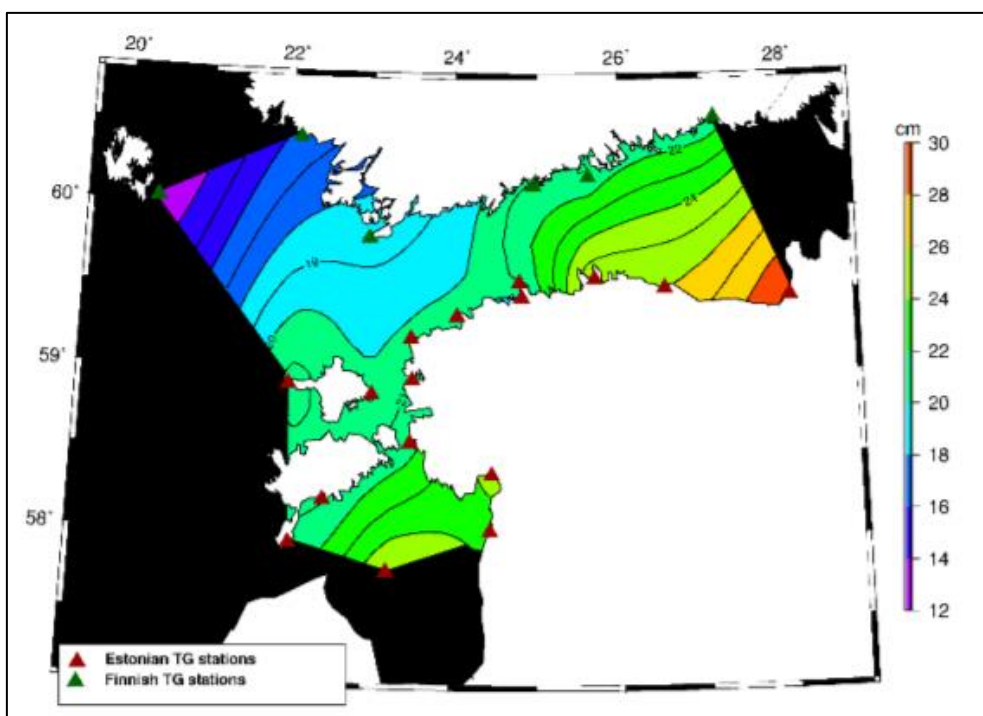
Joonis 2.29. Geoidi profiili (sinine) abil leitud geoidi trend (punane) altimeetria punktidest erindite eemaldamiseks.

Kui altimeetria kõrgus *Start*, *Validation* või *Stop* punktis osutus 4 iteratsiooni jooksul erindiks määrati altimeetria väärtus uuritavas punktis *Moving Average* ehk Liikuva Keskmise meetodil, perioodil 4. Kui altimeetria kõrgus erindiks ei osutunud, säilitati tema väärtus. Saadud kõrgused võetakse aluseks GNSS mõõtmistega ja geoidi mudeliga samas punktis saadud kõrguste võrdlemiseks.

3. TULEMUSED JA ARUTELU

3.1. Merepinna topograafia mõju veetaseme kõrgustele

Veetaseme kõrguste võrdlemisel valideerimispunktide ja Dirhami veemõõdujaama vahel on oluline arvestada ka merepinna topograafiat (SST – *Sea Surface Topography*) (vt Joonis 1.1). Kõrgemad ja madalamad kohad merepinnal on iseloomulikud nagu mäed ja orud maapinnal. Kollo ja Ellmann (2018) on oma uurimistöös välja toonud 2014-2017 aasta andmete põhjal loodud üldise merepinna topograafia kaardi Läänemere kohta (vt Joonis 3.1). Merepinna topograafia kasvab Läänemeres idasuunaliselt (Kollo & Ellmann, 2018; Kakkuri & Poutanen, 1997). Joonisel 3.1 võib täheldada paari millimeetri suurust veetaseme muutust Dirhami veemõõdujaama ja *Validation* punkti vahel. Samuti on paari millimeetrine vahe Dirhami veemõõdujaama ja *Start* ning *Stop* punktide veetaseme kõrguste vahel.



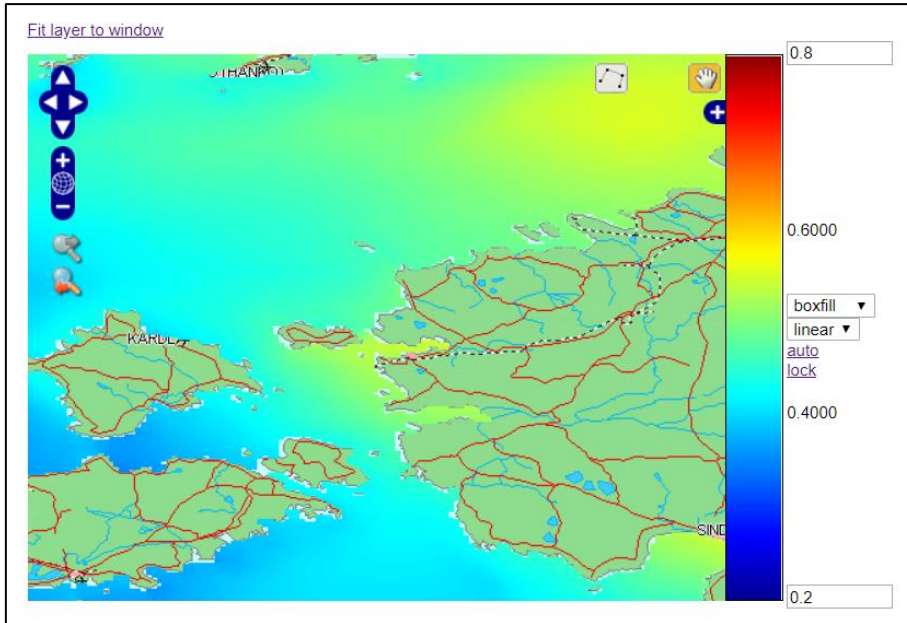
Joonis 3.1. 2014-2017 aasta andmete põhjal loodud SST kaart Läänemere kohta. Punasega on tähistatud Eesti veemõõdujaamad, rohelisega Soome veemõõdujaamad. (Kollo & Ellmann, 2018)

Joonise 3.1 põhjal saadud veetaseme kõrguslikud erinevuse veemõõdujaama ja valideerimispunktide vahel võib pidada olematuteks, mistõttu seda kõrguste võrdlemisel ei arvestatud. Kuna tegemist on üldise Läänemere merepinna topograafia kaardiga ning ilmastikust tingitud veetaseme muutuste kohta infot ei anna, on analüüsi kaasatud ka Läänemere veetaseme kohta koostatavad prognoosmudelid.

HIROMB (*High-Resolution Operational Model of the Baltic Sea*) on operatiivne prognoosmudelite süsteem Läänemere kohta. Süsteemi hallatakse ja arendatakse konsortiumlepingu alusel Rootsi Meteoroloogia ja Hüdroloogia Instituudi (SMHI), Saksa Meresõidu ja Hüdrograafia Liiduameti (BSH), Soome Keskkonnainstituudi (SYKE), Taani Kuningliku Meresõidu ja Hüdrograafia Administratsiooni (RDANH) ning TTÜ Meresüsteemide Instituudi poolt. (Kõuts, et al., 2006)

Kosmoseprogrammi projekti „MyOcean“ raames arendati HIROMB mudelist välja HBM-EST ehk HIROMB-BOOST-EST mudel (Lagemaa, et al., 2015). Sama projekti raames arendati välja ka meremudelite tulemuste kasutajaliides Eesti Merealade InfoSüsteem (EMIS), mis on veebis vabalt kättesaadav aadressil <http://emis.msi.ttu.ee/> (Lagemaa, et al., 2015). Lisaks mudelite kuvamisele on seal võimalik need ka alla laadida NetCDF formaadis. Mudelid on kasutajale kättesaadavad ühe tunnise intervalliga (Tallinna Tehnikaülikool, n.d.).

HBM-EST mudelite kasutamine võrdluses põhineb ilmastikust tingitud veetaseme kõrguste erinevustest tuleneva parandi leidmisel ($\Delta HBM-EST$). EMIS koduleheküljel on võimalik kuvada meretopograafia mudelid, mis iseloomustavad veetaseme kõrgust üle keskmise merepinna (EST-GEOID2017 pinna) (vt Joonis 3.2).



Joonis 3.2. Eesti Merialade InfoSüsteemi koduleheküljel (<http://emis.msi.ttu.ee/>) kaardiaknas kuvatav mudel, mis iseloomustab veetaset üle keskmise merepinna 23. augustil 2018 kell 9.00 (UTC).

Nimetatud mudeli abil leiti veetaseme kõrgus üle keskmise merepinna Dirhami veemõõdujaamas ($H_{HDM}(X_{TG}, Y_{TG}, t)$) ning valideerimispunktides ($H_{HDM}(X_{VP}, Y_{VP}, t)$) Hetkelisest merepinna topograafiast tulenev parand $\Delta HBM-EST$ leiti järgneva valemiga 3.1:

$$\Delta HBM - EST(X_{VP}, Y_{VP}, t) = H_{HDM}(X_{VP}, Y_{VP}, t) - H_{HDM}(X_{TG}, Y_{TG}, t), \quad (3.1)$$

kus $H_{HDM}(X_{VP}, Y_{VP}, t)$ on veetaseme kõrgus üle keskmise merepinna valideerimispunktis ning $H_{HDM}(X_{TG}, Y_{TG}, t)$ on veetaseme kõrgus üle keskmise merepinna Dirhami veemõõdujaamas. $\Delta HBM-EST$ parand lisati $\Delta GNSS$ ja $\Delta geoid$ paranditele juurde ning lõplikud kõrgused, mida altimeetria andmetega võrreldi saadi järgneva valemitega 3.2 ja 3.3.

$$SSH_{GNSS} = h_{Dirhami VMJ}(t) + \Delta GNSS + \Delta HBM + EST(X_{VP}, Y_{VP}, t), \quad (3.2)$$

kus $h_{Dirhami VMJ}(t)$ on ülelennu ajal mõõdetud veetase Dirhami veemõõdujaamas, $\Delta GNSS$ GNSS mõõtmistega saadud parand valideerimispunkti ja Dirhami veemõõdujama vahel ning $\Delta HBM-EST(X_{VP}, Y_{VP}, t)$ ilmastikust tingitud merepinna topograafia parand valideerimispunkti ja Dirhami veemõõdujama vahel.

$$SSH_{geoid} = h_{Dirhami VMJ}(t) + \Delta geoid + \Delta HBM - EST(X_{VP}, Y_{VP}, t), \quad (3.3)$$

kus $h_{DirhamiVMJ}(t)$ on ülelennu ajal mõõdetud veetase Dirhami veemõõdujaamas, $\Delta geoid$ on EST-GEOID2017 kõrguste erinevus valideerimispunkti ja Dirhami veemõõdujama vahel ning $\Delta HBM-EST(X_{VP}, Y_{VP}, t)$ ilmastikust tingitud merepinna topograafia parand valideerimispunkti ja Dirhami veemõõdujama vahel.

Kahel kuupäeval (1. märts 2017 ja 12. november 2018) ei olnud HBM-EST mudelist veetaseme kõrgused üle keskmise merepinna kättesaadavad.. Need on Sentinel-3A ülelennu kuupäevad ning mõjutavad seega *Validation* ja *Stop* punkte. Olenemata sellest, et nende ülelendude andmeid ei olnud võimalik hetke merepinna topograafia parandiga parandada, jäeti need siiski analüüsi sisse.

$\Delta HBM-EST(X_{VP}, Y_{VP}, t)$ parandid jäid Start punktis vahemikku $-0,02$ kuni $0,03$ m, Validation punktis vahemikku $-0,05$ ja $+0,04$ m ning Stop punktis vahemikku $-0,02$ kuni $+0,06$ m. Oli ka neid ülelende, kus hetke topograafia parand oli 0. Hetke merepinna topograafiast tulenevad parandid on lisatud Lisa 2 tabelitesse ning järgnevalt on välja toodud ning analüüsitud valideerimise tulemusi.

3.2. Altimeetria andmete võrdlemine veemõõdujama andmetega

Altimeetria andmete võrdlemine veemõõdujama andmetega toimus ülelendude kaupa igas valideerimispunktis eraldi. Lisa 2 tabelitest on näha, et Sentinel-3A andmerida algab 2016. aasta juunist. 2017. aasta nii *Validation* punkti, kui ka *Stop* punkti tabelitest puudub detsembrikuu ülelennu kõrguste võrdlused, kuna 2017. aasta viimane ülelend toimus 23. detsembril ning sellel kuupäeval ei ole Riigi Ilmateenistuse koduleheküljel välja toodud Dirhami VMJ kõrgusandmeid. Samuti on puudu 2018. aasta jaanuari kuu ülelennu andmete võrdlus *Stop* punktis, kuna SSHA väärtuseks valitud laius- ja pikkuskraadidel oli DV, mis tähendab, et altimeetria andmed selles punktis puuduvad, mistõttu ei olnud võimalik arvutada veetaseme kõrgust. Kuna tegemist on talvise ajaga, siis uuriti jääkatte olemasolu Läänemeresel sellel kuupäeval, ning leiti, et *Stop* punkt jäi jääkatte piirialasse. See tähendab, et selles piirkonnas võis esineda triivivaid jääpankasid ning altimeetri signaal satelliidini tagasi ei jõudnudki. Sentinel-3B andmerida algab 2018. aasta detsembri kuust ning analüüsi on kaasatud esimesed viis andmerida. Lisa 2 tabelite põhjal on näha, et kohati klapivad altimeetria andmed mõne sentimeetri täpsusega veemõõdujama andmetega, ent samas esineb ka peaaegu meetriseid erinevusi.

Sentinel-3A andmete valideerimiseks võrreldi omavahel 34 ülelennu andmeid *Validation* punktis ning 33 ülelennu andmeid *Stop* punktis. $\Delta GNSS$ ja $\Delta geoid$ erinevus *Validation* punktis oli 0,02 m ning *Stop* punktis 0,03 m, mis tähendab, et ka Lisa 2 tabelites on ridade $SSH_A - SSH_{geoid}$ ja $SSH_A - SSH_{GNSS}$ erinevus vastavalt 0,02 m ja 0,03 m. 2016. aastal *Validation* punktis jäävad enamuse $SSH_A - SSH_{GNSS}$ väärtused vahemikku -0,09 kuni +0,15 m. Kõige suuremaks erinevuseks on +0,41 m 17.oktoobri ülelennu andmete võrdluses. Kõige väiksemaks erinevuseks on +0,08 m 13.novembri ülelennul. 2017. aasta tulemused on mõnevõrra paremad. Kolmeteistkümnest ülelennust viie ülelennu kõrguste võrdluse tulemused jäävad alla $\pm 0,1$ m. Veidi suuremad erinevused (+0,31 m, -0,21 m ja +0,20 m) on vastavalt 21. mai, 14. juuli ja 6. septembri ülelendude andmete võrdlemisel. Kõige suurem erinevus (+0,96 m) on 17.juunil. 2018. aasta kõige halvemaks tulemuseks on +0,24 m suurune erinevus altimeetria ja veemõõdujaama andmete vahel (7. mail). 12. novembri erinevus on +0,20 m ja 15. veebruari erinevus +0,14 m ning ülejäänud tulemused jäävad kõik alla $\pm 0,1$ m. Kõige paremateks tulemusteks on +0,01 ja -0,01 meetri suurused erinevused 9. detsembri ja 27. juuli andmetes.

Kõrguste võrdluste tulemused *Stop* punktis on sarnased *Validation* punktile. 2016. aasta $SSH_A - SSH_{GNSS}$ väärtused jäävad vahemikku -0,20 kuni +0,50 m. Kõige paremaks tulemuseks on kõrguste erinevuse puudumine 28. juuli ülelennu andmetes. 2017. aastal on suuremaid erinevusi rohkemate ülelendude korral. 6. jaanuari ülelennul on kõrguste erinevuseks +0,89 m ja 24. aprillil -1,42 m. Lisaks veel mõned paarikümne meetri suurused erinevused. 2018. aasta kõige suuremaks erinevuseks on -0,96 m 7. mail ning ülejäänud tulemused jäävad -0,15 ja +0,36 meetri vahemikku. $SSH_A - SSH_{geoid}$ väärtused on sarnased kirjeldatule, ent 0,03 meetrise erinevusega.

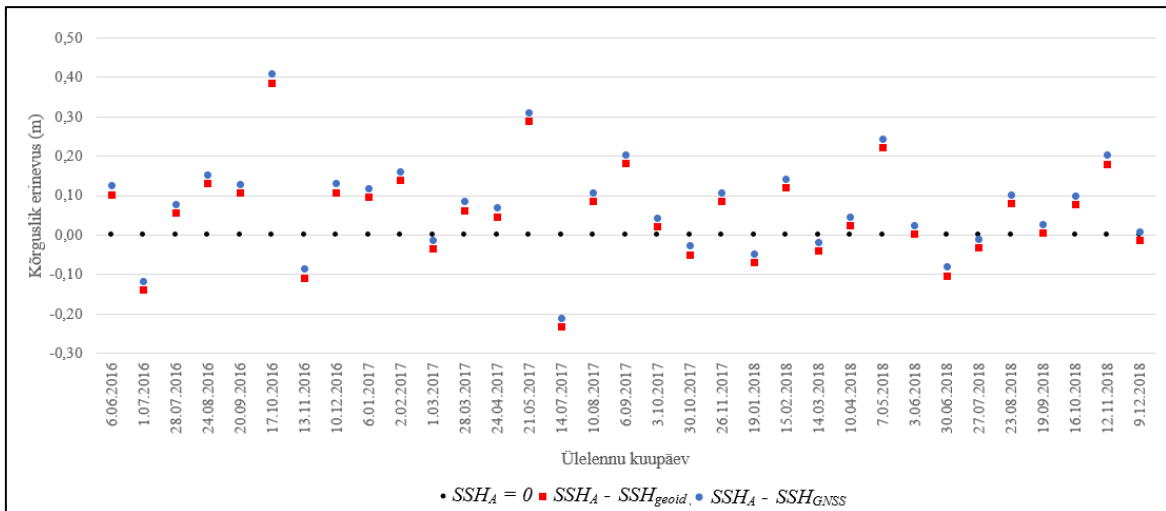
Sentinel-3B valideerimiseks võrreldi omavahel viie ülelennu andmeid *Validation* punktis ning viie ülelennu andmeid *Start* punktis. $\Delta GNSS$ ja $\Delta geoid$ erinevus *Start* punktis puudub, mis tähendab, et $SSH_A - SSH_{geoid}$ ja $SSH_A - SSH_{GNSS}$ *Start* punktis on samad. *Validation* punktis olid kaks $SSH_A - SSH_{GNSS}$ väärtust +0,09 m, kaks +0,18 m ja +0,23 m ning 30. jaanuari 2019 andmetes erinevus puudub. *Start* punktis võib 3. jaanuari 2019 altimeetria tulemuse lugeda ebaõnnestunuks, kuna veepinna väärtuseks on mõõdetud -7,41 m, mis suure tõenäosusega on tingitud jääoludest, mis mõjutas signaali. 26. veebruari 2019 kõrguste erinevus on +0,10 m, mis on ka parimaks tulemuseks *Start* punktis.

Sentinel-3B valitud ülelendudest 4 juhtusid olema talvise perioodi omad. Seetõttu uuriti Läänemere jääga kaetavust ning jää paksust nendel kuupäevadel. Selgus, et kolme ülelennu ajal oli *Start* punkti piirkonnas Läänemeri kaetud jääga. See tähendab, et altimeetri signaal võis olla sellest häiritud ning kehvad tulemused sellest tingitud. Sentinel-3A ülelendude kuupäevadel *Validation* ning *Stop* punktides jääd ei esinenud.

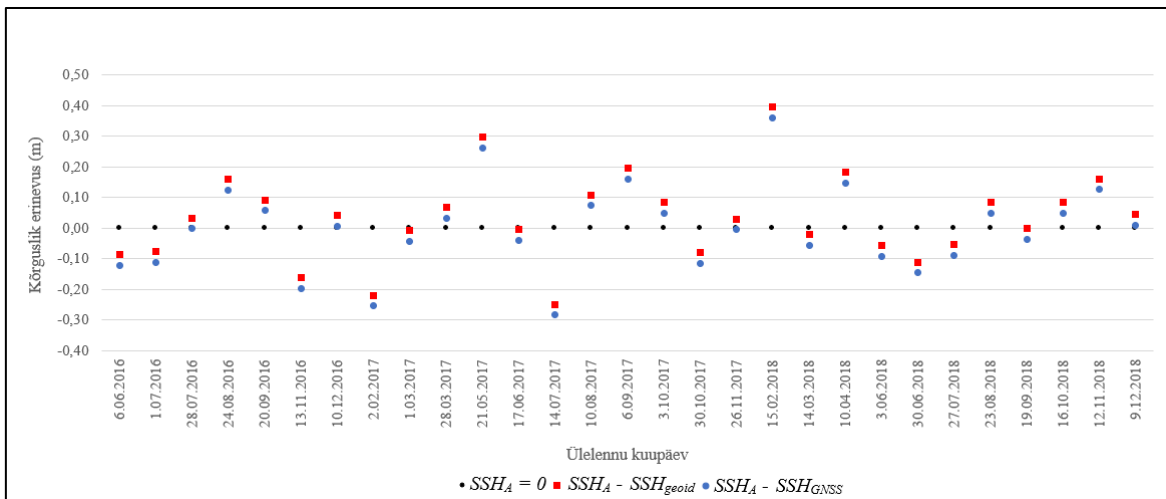
Lisa 2 tabelite põhjal on koostatud järgnevad joonised 3.3 – 3.6 *Start*, *Validation* ja *Stop* punktide kohta, eristades omavahel Sentinel-3A ja Sentinel-3B andmeid. Joonistel on altimeetria (SSH_A) väärtused määratud nulliks ning sinised täpid joonistel kujutavad $SSH_A - SSH_{GNSS}$ väärtusi ja punased ruudud $SSH_A - SSH_{geoid}$ väärtusi. Ühele joonisele on lisatud kogu valitud perioodi ülelendude andmed ning eemaldatud on jämedad vead. Jämedateks vigadeks arvestati need kõrguste erinevuste absoluutväärtused, mis olid üle 0,5 m (nt 17.oktoobri 2016 ülelend). Jämedate vigade kuupäevad on välja toodud tabelis 3.1. *Validation* punkti ja *Stop* punkti joonistelt joonistub välja oluliselt väiksem kõrguste erinevus 2018. aastal, võrreldes 2016. ja 2017. aastatega. Joonistelt on näha, et kõrguste erinevus kujutavad tähised jäävad pigem 0 teljest ülesse poole või enam-vähem samale kõrgusel. See tähendab, et suuremate erinevuste korral on altimeetria veetaseme väärtused mõõdetud kõrgemaks, kui seda on veemõõdujaama andmed. Samuti on joonistelt näha, et kõrguste erinevused jäävad ligikaudu vahemikku $-0,2$ kuni $+0,4$ m.

Tabel 3.1. Sentinel-3A ja Sentinel-3B ülelendude kuupäevad, kus esinevad suured kõrguslikud erinevused altimeetria ja VMJ andmete vahel

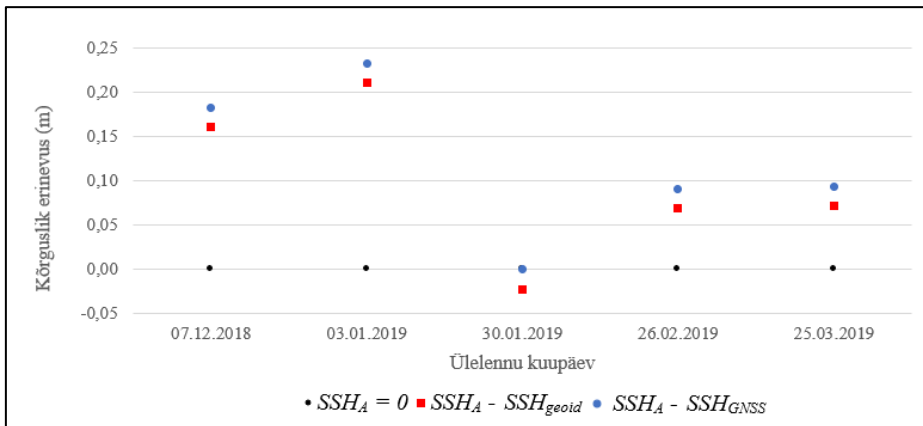
Punktid	Kuupäevad			
<i>Start</i>	3. jaanuar 2019	-	-	-
<i>Validation</i>	17. juuni 2017	-	-	-
<i>Stop</i>	7. mai 2018	6. jaanuar 2017	24. aprill 2017	17. oktoober 2016



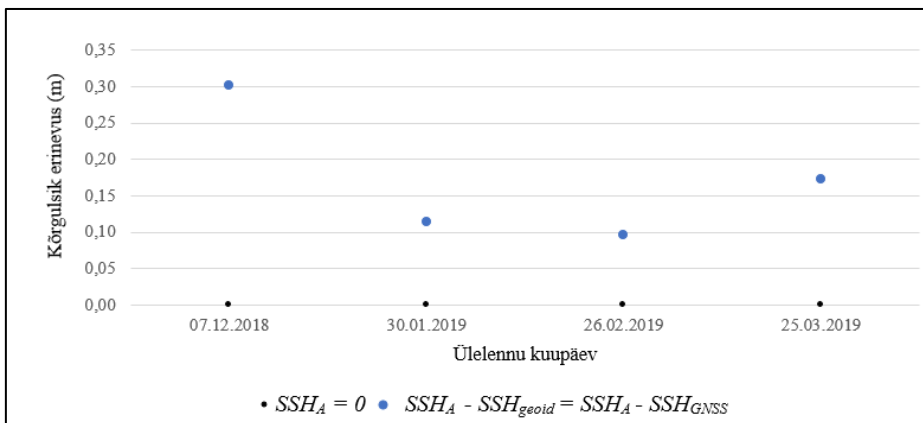
Joonis 3.3. Sentinel-3A altimeetria (SSH_A) andmete võrdlemine SSH_{geoid} ja SSH_{GNSS} väärtustega *Validation* punktis. Joonisel on kujutatud kogu valitud perioodi (juuni 2016 – detsember 2018) ülelende.



Joonis 3.4. Sentinel-3A altimeetria (SSH_A) andmete võrdlemine SSH_{geoid} ja SSH_{GNSS} väärtustega *Stop* punktis. Joonisel on kujutatud kogu valitud perioodi (juuni 2016 – detsember 2018) ülelende.



Joonis 3.5. Sentinel-3B altimeetria (SSH_A) andmete võrdlemine SSH_{geoid} ja SSH_{GNSS} väärtustega *Validation* punktis. Joonisel on kujutatud kogu valitud perioodi (detsember 2018 – märts 2019) ülelende.



Joonis 3.6. Sentinel-3B altimeetria (SSH_A) andmete võrdlemine SSH_{geoid} ja SSH_{GNSS} väärtustega *Start* punktis. Joonisel on kujutatud kogu valitud perioodi (detsember 2018 – märts 2019) ülelende.

Järgnevalt on $SSH_A - SSH_{geoid}$ ja $SSH_A - SSH_{GNSS}$ väärtuste põhjal leitud standardhälve (vt valem 3.4) ning RMSE ehk ruutkeskmine viga (vt valem 3.5).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}, \quad (3.4)$$

kus x_i on $SSH_A - SSH_{geoid}$ või $SSH_A - SSH_{GNSS}$ väärtus, \bar{x} on erinevuste keskmine ja n mõõtmistulemuste arv.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - F_i)^2}{n}}, \quad (3.5)$$

kus A_i on altimeetria väärtus (SSH_A), F_i SSH_{geoid} või SSH_{GNSS} väärtus ning n mõõtmistulemuste arv.

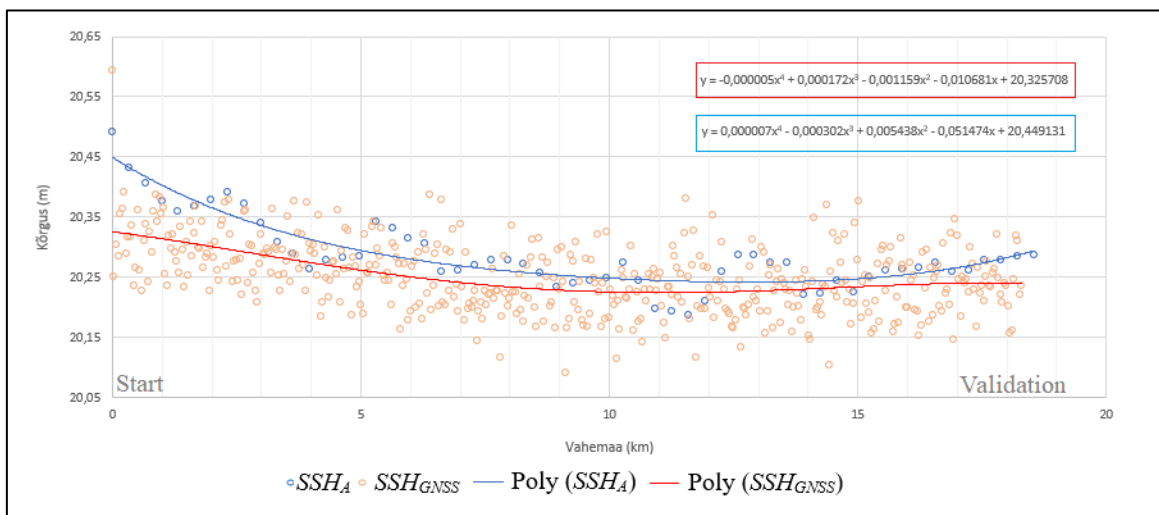
Tabel 3.2. Altimeetria ja veemõõdujaama kõrguste erinevuste põhjal arvatud statistikud

VMJ	Orbiit	Punkt	Meetod	\bar{x} (m)	σ (m)	RMSE (m)	Kaugus VMJ-st/rannikust (km)
Dirhami	36	Validation	$SSH_A - SSH_{geoid}$	0,05	0,12	0,13	12,4/5,4
			$SSH_A - SSH_{GNSS}$	0,08	0,12	0,14	12,4/5,4
		Stop	$SSH_A - SSH_{geoid}$	0,04	0,14	0,14	23,2/3,4
			$SSH_A - SSH_{GNSS}$	0,00	0,14	0,14	23,2/3,4
	255	Validation	$SSH_A - SSH_{geoid}$	0,10	0,09	0,13	12,4/5,4
			$SSH_A - SSH_{GNSS}$	0,12	0,09	0,14	12,4/5,4
		Start	$SSH_A - SSH_{geoid}$	0,17	0,09	0,19	13,2/2,8
			$SSH_A - SSH_{GNSS}$	0,17	0,09	0,19	13,2/2,8

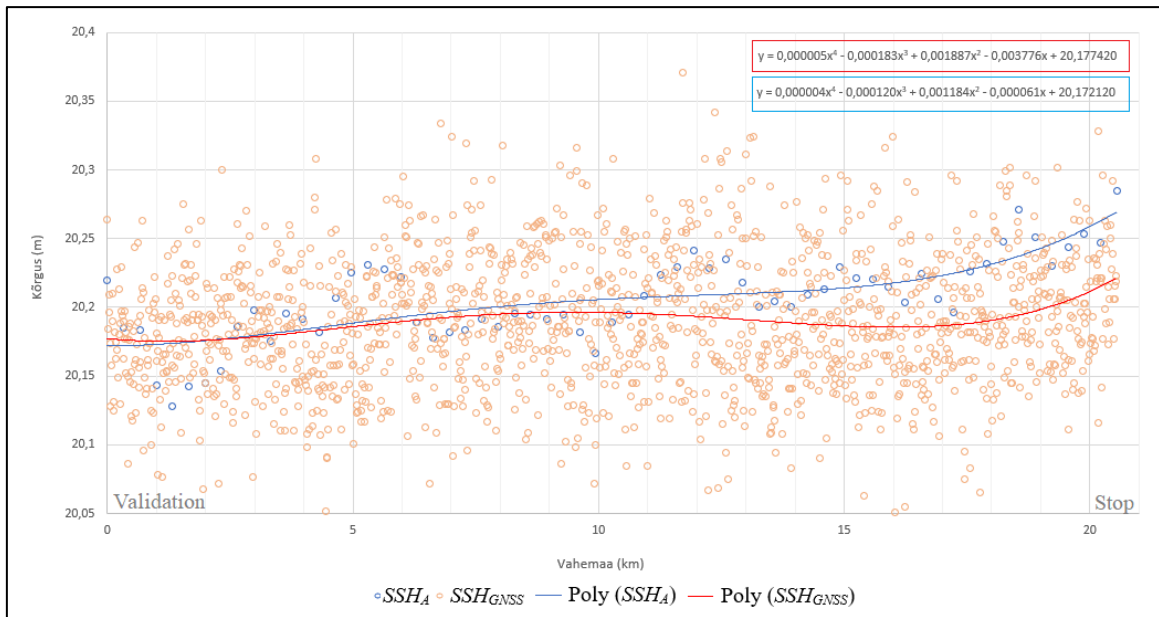
Tabelis 3.2 lähtub, et standardhälbe ja RMSE väärtused on põhimõtteliselt ühesugused sõltumata valideerimise meetodist. Keskmise kõrguste erinevus $SSH_A - SSH_{geoid}$ meetodil on *Validation* punktis +0,05 m (Sentinel-3A) ja +0,10 m (Sentinel-3B). *Stop* punktis +0,04 meetrit ja *Start* punktis +0,17 meetrit. $SSH_A - SSH_{GNSS}$ meetodil on keskmiseks kõrguste erinevuseks *Validation* punktis +0,08 m (Sentinel-3A) ja +0,12 m (Sentinel-3B). *Stop* punktis on keskmine erinevus 0,00 meetrit ja *Start* punktis +0,17 meetrit. Üldise Sentinel-3A ja Sentinel-3B täpsushinnangu andmiseks on leitud keskmine kõrguste erinevus Sentinel-3A puhul arvestades nii *Validation* kui *Stop* punkti ning Sentinel-3B puhul arvestades *Validation* ja *Start* punkti. Leitud keskmistele on juurde lisatud standardhälve. Standardhälbe väärtused on *Validation* punktis väiksemad kui *Stop* punktis. Samas on *Validation* punkt rannikust kaugemal kui *Stop* punkt, mis tähendab, et *Validation* punktis võikski altimeetria kõrgus täpsem olema. Olenemata sellest, et *Start* punkt on kõige lähemal rannikule, on standardhälbe väärtus selles punktis kõige väiksem. See tähendab, et Sentinel-3A täpsuseks on antud uurimistöös saadud $0,04 \pm 0,13$ m ($SSH_A - SSH_{geoid}$) ja $0,04 \pm 0,14$ m ($SSH_A - SSH_{GNSS}$) ning Sentinel-3B täpsuseks $0,13 \pm 0,09$ m ($SSH_A - SSH_{geoid}$) ja $0,14 \pm 0,09$ m ($SSH_A - SSH_{GNSS}$). Keskmise järgi on Sentinel-3A täpsus parem kui Sentinel-3B täpsus, ent Sentinel-3A tulemused varieeruvad rohkem. Sellegi poolest võib öelda, et Sentinel-3A täpsus uurimispiirkonnas on üllatavalt hea, arvestades valideerimispunktide 2,8 – 5,4 kilomeetrist kaugust rannikust ning ranniku ümbritsemist kolmest küljest.

3.2.1. Trassi valideerimine

Lisaks valideerimispunktidele arvutati valemi 3.2 põhjal kõrgused igale merel mõõdetud punktidele *Start* → *Validation* ning *Validation* → *Stop* trajektoiril. Trassi valideerimiseks valiti mõlema satelliidi puhul valideerimispäevale ajaliselt kõige lähem ülelend ning välditi talvise perioodi ülelende, 23.08.2018 Sentinel-3A ning 25.03.2019 Sentinel-3B puhul. Altimeetria andmetes kontrolliti erindite olemasolu. Erindite olemasolul määrati altimeetria kõrgus Liikuva Keskmise meetodi abil (vt ptk 2.5). Mõlemal meetodil saadud kõrgused pandi ühele joonisele ning mõlemate andmete põhjal moodustati 4. astme polünoomiline trendijoon ning võrreldi trendijoonte kokkulangevust trajektooridel. Võrdlused *Start* → *Validation* trajektooril on välja toodud joonis 3.7 ning *Validation* → *Stop* trajektooril joonis 3.8.



Joonis 3.7. Sentinel-3B altimeetria andmete (SSH_A) (25.03.2018 ülelend) võrdlemine SSH_{GNSS} väärtustega *Start* → *Validation* trajektooril.



Joonis 3.8. Sentinel-3A altimeetria andmete (SSH_A) (23.08.2018 ülelend) võrdlemine SSH_{GNSS} väärtusega *Validation* → *Stop* trajektoiril.

Joonisel 3.7 ja joonisel 3.8 on sinisega tähistatud altimeetria andmete trendijoon ning punasega valemiga 3.2 saadud kõrguste trendijoon. Nagu näha, siis jälgivad trendijooned üksteist küllaltki hästi. Suuremad erinevused tekivad valideerimispunktidele lähenedes. Selleks, et hinnata altimeetri andmete täpsust *Start* → *Validation* ja *Validation* → *Stop* trassidel, leiti mõlema trassi puhul 4. astme polünoomiliste võrrandite abil kõrgusväärtused iga täis kilomeetri kohta (SSH_A ja SSH_{laeval}) (vt Tabel 3.3 ja Tabel 3.4)

Tabel 3.3. Altimeetria kõrguste (SSH_A) võrdlemine SSH_{laeval} väärtustega *Start*→*Validation* trassil kasutades mõõtmisandmete põhjal moodustatud 4. astme polünoomilisi võrrandeid

Kilomeetrid	SSH_A (m)	SSH_{laeval} (m)	$SSH_A - SSH_{laeval}$ (m)
1	20,40	20,31	0,09
2	20,37	20,30	0,06
3	20,34	20,29	0,05
4	20,31	20,27	0,04
5	20,29	20,26	0,03
6	20,28	20,25	0,03
7	20,27	20,24	0,03
8	20,26	20,23	0,03
9	20,25	20,23	0,02
10	20,25	20,22	0,02
11	20,24	20,22	0,02
12	20,24	20,22	0,01
13	20,24	20,23	0,01
14	20,23	20,23	0,01
15	20,24	20,23	0,00
16	20,24	20,23	0,00
17	20,25	20,24	0,01
18	20,26	20,24	0,02
19	20,28	20,23	0,04
20	20,30	20,22	0,07

Tabel 3.4. Altimeetria kõrguste (SSH_A) võrdlemine SSH_{laeval} väärtustega *Validation* → *Stop* trassil kasutades mõõtmisandmete põhjal moodustatud 4. astme polünoomilisi võrrandeid

Kilomeetrid	SSH_A (m)	SSH_{laeval} (m)	$SSH_A - SSH_{laeval}$ (m)
1	20,17	20,18	0,00
2	20,18	20,18	0,00
3	20,18	20,18	0,00
4	20,18	20,18	0,00
5	20,19	20,19	0,00
6	20,19	20,19	0,00
7	20,20	20,19	0,01
8	20,20	20,19	0,01
9	20,21	20,20	0,01
10	20,21	20,20	0,01
11	20,21	20,19	0,02
12	20,22	20,19	0,03
13	20,22	20,19	0,03
14	20,23	20,18	0,04
15	20,24	20,18	0,05
16	20,24	20,18	0,07
17	20,26	20,18	0,08
18	20,27	20,18	0,10
19	20,30	20,18	0,11
20	20,32	20,19	0,13

Arvutatud kõrgusväärtustest leiti vahe $SSH_A - SSH_{laeval}$ ning vahedest keskmine ja standardhälve. Arvutuste tulemusena on Sentinel-3B täpsus *Start* → *Validation* trassil $0,03 \pm 0,02$ m ja Sentinel-3A täpsus *Validation* → *Stop* trassil $0,04 \pm 0,04$ m. Selle hinnangu põhjal ning joonise 3.7 ja joonise 3.8 põhjal on altimeetria andmete kokkulangemine veemõõdujaama andmetega väga hea. Sentinel-3B täpsus on isegi mõnevõrra parem, kui Sentinel-3A täpsus, olenemata sellest, et *Start* → *Validation* trass on rannikule lähemal ning rohkem saarte vahel. Silmas tuleb siiski pidada asjaolu, et andmed on silutud.

Olgugi et standardhälbed altimeetria ja veemõõdujaama kõrguste võrdlemisel tulevad valideerimispunktides 0,1 meetri lähedale ning trassidel 0,02 ja 0,04 meetrit, on siiski tulemustes märkimisväärne hulk mõõtmistulemusi, kus esinesid jämedad vead (vt Tabel 3.1). Suurte kõrguslike erinevuste põhjuste leidmiseks on järgnevalt uuritud merepinna topograafia mõju veetaseme kõrgustele ning analüüsi on lisatud Soome veemõõdujaama Hanko andmed.

3.3. Dirhami VMJ andmete võrdlemine Soome VMJ andmetega

Kuna merepinna topograafia parandi lisamine veemõõdujaama andmetele ei elimineerinud tabelis 3.1 välja toodud kuupäevadel esinenud suuri kõrguslike erinevusi, siis otsustati nende kuupäevade kohta alla laadida Soome veemõõdujaama Hanko veetaseme kõrgused. Veetaseme kõrgused on võimalik alla laadida Soome Meteoroloogia Instituudi (*Finnish Meteorological Institute*) koduleheküljelt en.ilmatieteenlaitos.fi. Tabelis 3.5 on välja toodud Dirhami VMJ ja Soome Hanko VMJ veetasemed ja erinevused üksteisest. Dirhami VMJ veetaseme väärtused on EH2000 süsteemis ning Hanko VMJ veetaseme väärtused N2000 süsteemis. Kuna mõlema kõrgussüsteemi aluseks on Amsterdami null, on kõrgused omavahel võrreldavad.

Tabel 3.5. Dirhami VMJ ja Hanko VMJ veetasemed ja erinevused üksteisest

Kuupäev	Dirhami VMJ (m)	Hanko VMJ (m)	Vahe (m)
06. jaanuar 2017	0.462	0.322	0.140
24. aprill 2017	0.307	0.109	0.198
17. juuni 2017	0.262	0.083	0.179
17. oktoober 2016	-0.508	-0.468	0.040
07. mai 2018	0.085	-0.154	0.239
03. jaanuar 2019	0.140	-0.032	0.108

Tabeli 3.5 põhjal jäävad veetaseme muutused Dirhami VMJ ja Hanko VMJ vahel vahemikku 0,04 – 0,24 m, mis tähendab, et selliseid suuri kõrguslike erinevusi Läänemeres tabelis 3.1 välja toodud kuupäevadel ei olnud. Eeloleva arutelu põhjal (ptk 3.3 ja ptk 3.2) on tabelis 3.1 välja toodud kuupäevade altimeetria andmed määratud jämedateks vigadeks ning tabelis 3.2 välja toodud statistikud on arvatud nii, et jämedad vead on välja jäetud.

3.4. Tulemuste võrdlus varasemate uurimistulemustega

Antud uurimistöo tulemuste võrdlemiseks varasemate uurimistulemustega on peatükis 3.1. arvatud erinevad statistikud. Tabelis 3.2 on välja toodud standardhälbed ning keskmised ruutvead igas valideerimispunktis mõlema satelliidi jaoks ning need väärtused on võetud aluseks varasemate tulemuste võrdlemiseks.

Esmalt võrreldi saadud tulemusi Ellmann, et. al., (2018) tulemustega, kus sarnaselt antud tööga valideeriti Sentinel-3A satelliiti Läänemeres kohaliku geoidi mudelit kasutades.

Valideerimiseks oli valitud neli punkti Sentinel-3A trajektooridel, mis rannikust jäid 2 - 5 km ning veemõõdujaamadest 14,2-25,7 km kaugusele. Altimeetria andmete täpsuse hindamiseks arvutati mainitud töös RMSE väärtused nii igale punktile kui ka üle kõigi tulemuste. RMSE väärtused varieerusid 0,046 meetrist 0,103 meetrini ning üle kõigi tulemuste saadi RMSE väärtuseks 0,07 m. Käesoleva uurimistöo raames saadi RMSE väärtuseks geoidi mudelit kasutades *Start* punktis 0,19, *Validation* punktis 0,13 (Sentinel-3A) ja 0,13 (Sentinel-3B) ning *Stop* punktis 0,14 meetrit. GNSS mõõtmisi kasutades saadi väärtused vastavalt 0,19 m, 0,14 m ja 0,14 m ning 0,14 meetrit. Üle kõigi tulemuste saadi Sentinel-3A RMSE väärtuseks 0,14 m ($SSH_A - SSH_{geoid}$ ja $SSH_A - SSH_{GNSS}$ puhul sama) ning Sentinel-3B RMSE väärtuseks 0,16 m ($SSH_A - SSH_{geoid}$ puhul) ja 0,17 m ($SSH_A - SSH_{GNSS}$ puhul). See tähendab, et käesoleva uurimistöo tulemused tulid mõnevõrra kehvemad, kui Ellmann, et. al., (2018) tulemused.

Lisaks RMSE väärtuse hindamisel on altimeetria andmete täpsust hinnatud ka RMS väärtusega. Näiteks on kontrollitud AVISO võrgustatud altimeetria mudelit Türgi edela rannikul (Yildiz, et al., 2013) ning RMS väärtused saadi vahemikus 0,036 - 0,038 m. Olenemata sellest, et leiti RMS väärtus, võib selle võrdeks pidada RMSE väärtusega, sest see leiti kõrguste vahest ning tehniliselt leiti RMSE väärtus. Saadud RMSE väärtus on neli korda parem tulemus kui käesolevas töös saadud, ent siinkohal tuleb arvestada seda, et valideerimiseks kasutati altimeetria andmetest moodustatud mudelit, mitte üksikus punktis mõõdetud andmeid ning valideerimiskohad olid veemõõdujaamadest 6-13 km kaugusel. Seda, kui kaugel punktid rannikust olid ei ole märgitud. Selle põhjal võiks öelda, et mitmete erinevate satelliitide andmete põhjal moodustatud mudelid veepinna kohta on täpsemad, kui ühe kindla satelliidi mõõdetud kõrgused.

Võrreldes käesoleva töö tulemusi CryoSat-2 tulemustega Norra rannikul (Idžanovic, et al., 2016), võib julgelt väita, et Sentinel-3 on rannikulähedaste alade merepinna mõõdistamiseks sobivam. Idžanovic et al., (2016) võrdlesid 22 veemõõdujaama andmeid CryoSat-2 altimeetria andmetega, mis jäid ümber veemõõdujaama moodustatud 45x45 km suurusesse alasse. See tähendab, et veemõõdujaama andmetega võrreldi altimeetria andmeid, mis asusid väga ranniku lähedal, ent oli ka neid andmeid, mis olid rannikust 45 km kaugusel. Sellepärast eraldati lõpptulemustes rannikulähedane ning ookeani suunas avatud altimeetria täpsushinnang. Täpsushinnanguks leiti standardhälve ning rannikulähedastel aladel oli see suurem kui 0,2 m. Kui arvestada, et käesolevas töös

analüüsitud valideerimispunktid asusid rannikust 2,8 - 5,4 km kaugusel ning standardhälbeks saadi 0,13 m (Sentinel-3A) ja 0,19 m (Sentinel-3B), võib öelda, et Sentinel-3 on sobiva rannikulähedastel aladel mõõtmiseks.

Võrreldes Sentinel-3 täpsust rannikulähedastel aladel satelliide Jason-1 ja Jason-2 täpsustega, saab taaskord tõdeda, et Sentinel-3 on täpsem. Cretaux, et al., (2011) hindasid Jason-1 ja Jason-2 altimeetria andmete täpsust võrreldes altimeetria andmeid GPS mõõtmistega, mis tehti mööda satelliitide trajektoori väikelaevaga. Täpsuse hindamiseks leiti absoluutne viga (*absolute bias*) ning standardhälve, Jason-1 puhul $0,096 \pm 0,04$ m ja Jason-2 puhul $0,162 \pm 0,042$ m. Antud uurimistöös leiti absoluutne viga trassidel silutud kõrgusväärtuste põhjal (vt ptk 3.1.1.). Sentinel-3A puhul oli see $0,04 \pm 0,04$ m ja Sentinel-3B puhul $0,03 \pm 0,02$ m. Saadud tulemused on tunduvalt paremad kui Jason-1 ja Jason-2 põhjal saadud tulemused.

KOKKUVÕTE

Viimase viiekümne aasta jooksul on hakatud veetaseme kõrguse määramiseks kasutama satelliitaltimeetriat. Kui esialgu oli veetaseme kõrguse määramise täpsuseks 1 meeter või enam, siis 2019. aastaks on ookeanitel ja avameredel saavutatud sentimeetri täpsus. Märksa keerulisem ning ebatäpsem on veetaseme kõrguse määramine rannikulähedastel aladel, kus see on mõjutatud maapinna topograafiast, geofüüsikaliste parandite ebatäpsusest, veetaseme kiirest muutusest ning jalajälje suurusest veepinnal. Selleks, et rannikulähedase altimeetria täpsust tõsta, on oluline leida õige andmete kontrollimise ehk valideerimise meetod. Valideerimise meetodeid on mitmeid. Selleks võib kasutada nii veemõõdujaamasid, GPS-poisid, geoidi mudeleid kui ka näiteks väikelaevasid.

Käesoleva uurimistöö eesmärgiks oli satelliitide Sentinel-3A ja Sentinel-3B altimeetria andmete valideerimine Lääne-Eesti rannikulähedastel aladel GNSS mõõtmiste ning veemõõdujaama andmete abil. Selleks teostasid Eesti Maaülikooli õppejõud Aive Liibusk ja Kristina Türk GNSS mõõtmised Dirhami sadamas ja Läänemerel ning töö autori poolt koguti Sentinel-3A (juuni 2016 – detsember 2018) ja Sentinel-3B (detsember 2018 – märts 2019) altimeetria andmed. GNSS mõõtmiste teostamiseks planeeriti kolmest punktist (*Start*, *Validation* ja *Stop*) koosnev marsruut. Mõõtmised tehti 16. augusti 2018 väikelaevaga. Altimeetria andmete valideerimiseks teostati mõõtmised nii valideerimispunktides kui ka mööda *Start* → *Validation* ja *Validation* → *Stop* trasse. Kogutud andmed filtreeriti, töödeldi ning parandati laeva liikumiskiirusest ning antenni kõrguse sisestamise veast tulnud paranditega.

Kogutud altimeetria andmed olid L2 tüüpi ehk need olid juba eelnevalt töödeldud ning vajasid seetõttu vaid filtreerimist. Andmete filtreerimiseks kasutati programmi BRAT. Lisaks GNSS mõõtmiste ja altimeetria andmetele, leiti merepinna kõrguse andmed iga valitud Sentinel-3A ja Sentinel-3B ülelennu jaoks Dirhami veemõõdujaamast. Altimeetria andmete võrdlemiseks Dirhami veemõõdujaama andmetega, leiti merepinna kõrguste erinevus valideerimispunktides mõõdetud kõrguse ja veemõõdujaama mõõdetud kõrguse vahel ($\Delta GNSS$). Samuti leiti EST-GEOID2017 kõrguslik muutus valideerimispunktide ja veemõõdujaama vahel ($\Delta geoid$). Saadud parandeid kasutades leiti merepinna kõrgus valideerimispunktides iga ülelennu jaoks.

Kõrguste võrdlemise tulemusena leiti, et Sentinel-3A altimeetria andmed on võimalik Läänemere rannikulähedases piirkonnas saada $0,04 \pm 0,13$ m ($SSH_A - SSH_{geoid}$) ja $0,04 \pm 0,14$ m ($SSH_A - SSH_{GNSS}$) täpsusega ning Sentinel-3B andmed $0,13 \pm 0,09$ m ($SSH_A - SSH_{geoid}$) ja $0,14 \pm 0,09$ m ($SSH_A - SSH_{GNSS}$) täpsusega. See tähendab, et saavutatud täpsustega ei ole täidetud Sentinel-3 missiooni eesmärki (määrata veetase 2-3 cm täpsusega). RMSE väärtusteks Sentinel-3A puhul 0,14 m ja Sentinel-3B puhul 0,16 ja 0,17 m. Sellega ei ole küll saavutatud Ellmann, et al., (2018) poolt saadud täpsus 0,07 m (RMSE), ent sellegi poolest võib valideerimispunktide asukohta arvesse võttes tulemustega rahul olla. Nagu tulemustest näha, siis geoidi pinda ja GNSS mõõtmiste tulemusi kasutades saadi väga sarnased tulemused. See näitab, et Eesti rannikualadel on geoidi EST-GEOID2017 täpsus väga hea ja altimeetria andmete valideerimiseks piisab Eesti vetes geoidi mudeli kasutamisest. Eesti on üks väheseid riike maailmas, kellel on kasutada nii täpne geoidi mudel. Seega enamuses riikides tuleb endiselt satelliitaltimeetria andmete valideerimiseks kasutada ka GNSS mõõtmisi.

Kogu töö tulemuste põhjal ei saa kinnitada töö alguses püstitatud hüpoteesi, et Sentinel-3A ja Sentinel-3B altimeetria andmete abil on võimalik määrata Läänemere merepinna kõrgus rannikulähedastel aladel sarnaselt veemõõdujaama andmetega. Arvestades aga asjaolu, et valideerimispunktid ning mõõdetud trajektoorid asusid rannikule märkimisväärselt lähedal ning saarte vahel, siis on valideerimistulemused töö autori arvates arvestatavad ning palju lubavad ja töö eesmärk sai täidetud.

Edaspidistes uuringutes võiks GNSS mõõtmiste päeva valida täpselt satelliidi ülelennu päevaks. Seda üritati teha ka antud töö raames, ent Läänemere ilmaolude muutlikkuse tõttu, oli väga keeruline leida tuulevaikset ilma ning tasast merd, et valideerimine ideaalsetes tingimustes teostada. Lisaks eelnevale võiks omavahel võrrelda Sentinel-3 andmete edastuse kiiruse järgi jagatud erinevaid andmeid (NTC, NRT, STC).

KASUTATUD KIJANDUS

Abdullah, N. N. B., 2018. *The Optimal Retracked Sea Level from SARAL/AltiKa Satellite Altimetry over the Southeast Asia*. Magiströö. Skudai:Universiti Teknologi Malaysia.

ACRI-ST IPF Team, 2017. *Product data Format Specification - OLCI Level 1 Products*. [pdf] s.l.:s.n.

ACRI-ST IPF Team, 2018a. *Product Data Format Specification - SLSTR Level 1 Products*. [pdf] s.l.:s.n.

ACRI-ST IPF Team, 2018b. *Product Data Format Specification - SRAL and MWR Level 1 products*. [pdf] s.l.:s.n.

Amarouche, L. et al., 2004. Improving the Jason-1 ground Retracking to better Account for Attitude Effects. *Marine Geodesy*, 27(1-2), pp. 171-197.

Andersen, O. B., Ophaug, V. & Idžanović, M., 2018. Coastal sea level from CryoSat-2 SARIn altimetry in Norway. *Advances in Space Research*, 62(6), pp. 1344-1357.

AVISOa, n.d. *CRYOSAT*. [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://www.avis.altimetry.fr/en/missions/current-missions/cryosat.html>
[27.03.2019]

AVISOb, n.d. *Jason-2*. [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://www.avis.altimetry.fr/en/missions/current-missions/jason-2.html>
[18.03.2019]

AVISOc, n.d. *The Poseidon-3 altimeter*. [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://www.avis.altimetry.fr/en/missions/current-missions/jason-2/instruments/poseidon-3/index.html> [18.03.2019]

AVISOd, n.d. *Instruments on Sentinel-3*. [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://www.avis.altimetry.fr/en/missions/current-missions/sentinel-3a/instruments.html> [17.03.2019]

AVISOe, n.d. *CryoSat Instruments*. [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://www.avis.altimetry.fr/en/missions/current-missions/cryosat/instruments.html> [12.02.2019]

AVISOf, n.d. *Saral*. [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://www.avis.altimetry.fr/en/missions/current-missions/saral.html>
[15.03.2019]

AVISOg, n.d. *SWIM Radar*. [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://www.avis.altimetry.fr/en/missions/current-missions/cfosat/instruments/swim.html> [12.03.2019]

- AVISOh, n.d. *Jason-1*. [Vörgumaterjal]
 Leitav: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/missions/past-missions/jason-1.html>
 [17.03.2019]
- AVISOi, n.d. *Mean Sea Surface*. [Vörgumaterjal]
 Leitav: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/mss.html>
 [11.02.2019]
- Bateson, L., Novali, F. & Cooksley, G., 2009. *Terrafirma User Guide*, s.l.: s.n.
- Benveniste, J. & Picot, N., 2017. *Basic Radar Altimetry Toolbox: a new set of tools for all altimetry users*. [Vörgumaterjal]
 Leitav: <https://earth.esa.int/web/guest/content/-/article/basic-radar-altimetry-toolbox-a-new-set-of-tools-for-all-altimetry-users-5274> (08.03.2019)
- Birol, F. et al., 2017. Coastal applications from nadir altimetry: Example of the X-TRACK regional products. *Advances in Space Research*, 12 veebruar, 59(4), pp. 936-953.
- Bonekamp, H. et al., 2016. Core operational Sentinel-3 marine data product services as part of the Copernicus space Component. *Ocean Science*, Köide 12, pp. 787-795.
- Bonnefond, P. et al., 2003. Leveling the Sea Surface Using a GPS-Catamaran Special Issue: Jason-1 Calibration/Validation. *Marine Geodesy*, 26(3-4), pp. 319-334.
- Borde, F., Le Roy, Y., Deschaux-Beaume, M. & Mavrocordatos, C., 2010. SRAL, a radar altimeter designed to measure several surface types. *Remote Sensing of the Ocean, Sea Ice and Large Water Regions 2010*, Köide 7825.
- BRAT development team, 2018. *BRAT - Software user manual (BRAT version 4.2.1)*. [pdf] s.l.:s.n.
- Cazenave, A., Palanisamy, H. & Ablain, M., 2018. Contemporary sea level changes from satellite altimetry: What have we learned? what are the new challenges?. *Advances in Space Research*, 62(7), pp. 1639-1653.
- Chelton, D. B. et al., 2001. Satellite altimetry and earth sciences: A handbook of techniques and applications. *Satellite Altimetry*, pp. 1-132.
- Cheng, K.-C., 2004. *Radar Altimeter Absolute Calibration Using GPS Water Level Measurements*. Lõputöö. Ohio: The Ohio State Universit.
- Cipollini, P. et al., 2010. *The role of altimetry in coastal observing systems*. s.l.:ESA Publication WPP-306.
- Cretaux, J.-F. et al., 2011. Absolute Calibration of Jason Radar Altimeters from GPS Kinematic Campaigns Over Lake Issykkul. *Marine Geodesy*, 34(3-4), pp. 291-318.
- Donlon, C. et al., 2012. The Global Monitoring for environment and Security (GMES) Sentinel-3 mission. *Remote Sensing of Environment*, Köide 120, pp. 37-57.
- Drinkwater, M. R. & Rebhan, H., 2007. *Sentinel-3: Mission requirements document*, s.l.: European Space Agency.

Ellmann, A., Birgiel, E. & Delpêche-Ellmann, N., 2018. Examining the Performance of the Sentinel-3 Coastal Altimetry in the Baltic Sea Using a Regional High-Resolution Geoid Model. *2018 Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics)*, pp. 196-201.

ESA; CNESa, n.d. *5.1.3. Frequencies used & their impacts.* [Vörgumaterjal]
Leitav: <http://www.altimetry.info/radar-altimetry-tutorial/how-altimetry-works/frequencies-used-their-impacts/> [12.04.2019]

ESA; CNESb, n.d. *7.1.4 Geosat.* [Vörgumaterjal]
Leitav: <http://www.altimetry.info/missions/past-missions/geosat/> [09.04.2019]

ESA; CNESc, n.d. *7.1 Past missions.* [Vörgumaterjal]
Available at: <http://www.altimetry.info/missions/past-missions/> [09.03.2019]

ESA; CNESd, n.d. *7. Missions.* [Vörgumaterjal]
Leitav: <http://www.altimetry.info/missions/> [12.04.2019]

ESA; CNESe, n.d. *7.3.1 Jason-CS/Sentinel-6.* [Vörgumaterjal]
Leitav: <http://www.altimetry.info/missions/future-missions/jason-cs-sentinel-6/> [09.03.2019]

ESA, 2012. *Sentinel-3: ESA's Global Land and Ocean Mission for GMES Operational Services*, Noordwijk: ESA Communications.

ESA, 2014. *First Copernicus satellite now operational.* [Vörgumaterjal]
Leitav: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/First_Copernicus_satellite_now_operational [10.04.2019]

ESA, 2015. *ERS-1.* [Vörgumaterjal]
Leitav: <https://earth.esa.int/web/sppa/mission-performance/esa-missions/ers-1> [17.01.2019]

ESA, 2017a. *Types of Orbits.* [Vörgumaterjal]
Leitav: https://www.esa.int/Our_Activities/Space_Transportation/Types_of_orbits [11.04.2019]

ESA, 2018. *Sentinel-3B good to go.* [Vörgumaterjal]
Leitav: https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-3/Sentinel-3B_good_to_go [13.03.2019]

ESAA, n.d. *Revisit Time.* [Vörgumaterjal]
Leitav: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-altimetry/coverage/revisit-time> [16.03.2019]

ESAb, 2017. *Sentinel-3-A Bigger picture For Copernicus*, [pdf] s.l.: s.n.

ESAb, n.d. *Copernicus-Overview.* [Vörgumaterjal]
Leitav: https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Overview4 [18.02.2019]

ESAc, n.d. *Sentinel-3.* [Vörgumaterjal]
Leitav: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-3> [13.03.2019]

ESAd, n.d.. *Overview.* [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-3/overview> [17.02.2019]

ESAe, n.d.. *Mission Summary.* [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-3/overview/mission-summary> [12.02.2019]

ESAf, n.d.. *Sharing Earth Observation Resources.* [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/copernicus-sentinel-3> [12.02.2019]

ESAg, n.d.. *Satellite Description.* [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-3/satellite-description> [17.03.2019]

ESAh, n.d.. *Instrument payload.* [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-3/instrument-payload> [18.02.2019]

ESAi, n.d.. *Orbit.* [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-3/satellite-description/orbit> [19.02.2019]

ESAj, n.d.. *Near Real-Time or Non-Time Critical?.* [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-altimetry/product-types/nrt-or-ntc> [16.03.2019]

ESAk, n.d.. *Product Types.* [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-altimetry/product-types> [17.03.2019]

ESAl, n.d.. *Processing Levels.* [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-altimetry/processing-levels> [17.03.2019]

ESAm, n.d.. *Overwiev.* [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-altimetry/overview> [11.04.2019]

ESAn, n.d.. *Conventions.* [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-altimetry/definitions/conventions> [10.04.2019]

European Commission, 2015. *Copernicus- Europe's eyes on Earth*, Brüssel: Publications Office of the European Union.

Fenoglio, L. et al., 2011. Retracking altimeter waveforms near the coast. *rmt:: Coastal Altimetry*. Berliin: Springer, pp. 61-101.

Fernandez, J., Fernandez, C., Femenias, P. & Peter, H., n.d.. *The Copernicus Sentinel-3 Mission*, s.l.: s.n.

- Fu, L.-L., Chelton, D. B., Le Taron, P.-Y. & Morrow, R., 2010. Eddy Dynamics from Satellite Altimetry. *Oceanography*, 23(4), pp. 14-25.
- Gómez-Enri, J. et al., 2019. Wind-induced cross-strait sea level variability in the Strait of Gibraltar from coastal altimetry and in situ measurements. *Remote Sensing of Environment*, veebruar, Kõide 221, pp. 596-608.
- Håkanson, L. & Bryhn, A., 2008. Coastal Classifications and Key Abiotic Variables Regulating Target Bioindicators. pp. 19-58.
- Halimi, A., 2013. *From conventional to delay/Doppler altimetrya*. Doktoritöö. Toulouse: Université de Toulouse
- Kakkuri, J. & Poutanen, M., 1997. Geodetic Determination of the Surface Topography of the Baltic Sea. *Marine Geodesy*, 20(4), pp. 307-316.
- Kall, T., n.d.. *Satelliitide orbiidid*. [e-kursus] s.l.:s.n.
- Kaula, W. M., 1969. *The Terrestrial Environment: Solid Earth and Ocean Physics*, s.l.: NASA.
- Kollo, K. & Ellmann, A., 2018. *Geodetic reconciliation of tide gauge network in Estonia*. Helsingi, Finnish Geodetic Institute.
- Kramer, H. J., n.d.. *HY-2A*. [Võrgumaterjal]
Available at: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/h/hy-2a> (14.03.2019)
- Kramer, H. J., s.a.. *TOPEX/Poseidon*. [Võrgumaterjal]
Available at: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/t/topex-poseidon> (14.03.2019)
- Kõuts, T., Elken, J. & Lagemaa, P., 2006. *HIROMB mudelprognooside verifitseerimine ja meretaseme prognooside koostamine, periood september-november 2005*, Tallinn: TTÜ Meresüsteemide Instituut.
- Lagemaa, P. et al., 2015. *Mereprognooside uue põlvkonna süsteemi HB; rakendamine Eestis*, Tallinn: TTÜ Meresüsteemide Instituut.
- Lan Vu, P. et al., 2018. Multi-Satellite Altimeter Validation along the French Atlantic Coast in the Southern Bay of Biscay from ERS-2 to SARAL. *Remote Sensing*, 10(1), pp. 93-115.
- Liibus, A., 2013. *Rõhuanduritel põhinev täpne hüdrodünaamiline loodimine rakendatuna Eesti riikliku kõrgusvõrgu rekonstrueerimisel*. Doktoritöö. Tartu: Eesti Maaülikool.
- Maa-amet, 2019. *ESTHub teenused*. [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://geoportaal.maaamet.ee/est/Teenused/ESTHub-teenused-p629.html> [25.03.2019]
- Massachusetts Institute Of Technology, 1970. *The Terrestrial Environment: Solid-Earth And Ocean Physics*, Massachusetts: NASA CONTRACTOR.
- National Satellite Ocean Application Service, 2013. *HY-2A Satellite user's Guide*. s.l.:s.n.

- Nerem, R. S. & National Centre for Atmospheric Research Staff, 2016. *Global Mean Sea Level from TOPEX & Jason Altimetry*. [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/global-mean-sea-level-topex-jason-altimetry> [05.01.2019]
- Nerem, R. S., Tapley, B. D. & Shum, C. K., 1990. Determination of the ocean circulation using Geosat altimetry. *Journal of Geophysical Research*, Kõide 95, pp. 3163-3179.
- Otaegi, E. B., 2015. *Satellite altimetry on Greenland ice sheet mass balances*. Delft: Delft University of Technology.
- Pajak, K. & Kowalczyk, K., 2019. A comparison of seasonal variations of sea level in the southern Baltic Sea from altimetry and tide gauge data. *Advances in Space Research*, 63(5), pp. 1768-1780.
- Palacz, A. et al., 2017. *Report of the Workshop on the Implementation of Multidisciplinary Sustained Ocean Observations*, Miami: The Global Ocean Observing System.
- Pascual, A., Ruiz, S. & Tintoré, J., 2010. Combining new and conventional sensors to study the balearic current. *Sea Technology*, 51(7), pp. 32-36.
- Riebeek, H., 2009. *Catalog of Earth Satellite Orbits*. [Võrgumaterjal]
Available at: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/OrbitsCatalog> (17.03.2019)
- Riigi Ilmateenistus, n.d.. *Dirhami rannikujaam*. [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://www.ilmateenistus.ee/ilmateenistus/vaatlusvork/dirhami-rannikujaam/> [21.03.2019]
- Rosmorduc, V. et al., 2018. *Radar Altimetry Tutorial*. s.l.:ESA, CNES.
- Ruiz Etcheverry, L. A. et al., 2015. A comparison of the annual cycle of sea level in coastal areas from gridded satellite altimetry and tide gauges. *Continental Shelf Research*, Kõide 92, pp. 87-97.
- Saynisch, J., Irrgang, C. & Thomas, M., 2018. On the Use of Satellite Altimetry to Detect Ocean Circulation's Magnetic Signals. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(3), pp. 2305-2314.
- Scharroo, R., Smith, W. H. & Lillibridge, J. L., 2005. Satellite altimetry and the intensification of Hurricane Katrina. *EOS, Transactions, American Geophysical Union*, 86(40), pp. 365-366.
- Schröder, L. et al., 2017. Validation of satellite altimetry by kinematic GNSS in central East Antarctica. *The Cryosphere*, Kõide 11, pp. 1111-1130.
- Seeber, G., 1993. *Satellite Geodesy - 2nd completely revised and extended edition*. 1 toim. Berlin: Walter de Gruyter.
- Shum, C. K., Ries, J. C. & Tapley, B. D., 1995. The accuracy and applications of satellite altimetry. *Geophysical Journal International*, 121(2), pp. 321-336.
- Stammer, D. & Cazenave, A., 2017. *Satellite Altimetry Over Oceans and Land Surfaces*. s.l.:CRC Press.

- Taitus Software, n.d.. *Copernicus*. [Võrgumaterjal]
Leitav: <https://www.taitussoftware.com/products/applications/taitus-applications-for-copernicus-gmes/> [08.03.2019]
- Tallinna Tehnikaülikool, n.d.. *Eesti Merealade Infosüsteem*. [Võrgumaterjal]
Leitav: <http://emis.msi.ttu.ee/avaleht/> [02.03.2019]
- Tapley, B. D., Born, G. H. & Parke, M. E., 1982. The Seasat altimeter data and its accuracy assessment. *Journal of Geophysical Research*, Köide 90, pp. 1976-1984.
- United Nations, 2017. *The Ocean Conference*. New York: s.n.
- Wang, X. & Ichikawa, K., 2017. Coastal Waveform Retracking for Jason-2 Altimeter Data Based on Along-Track Echograms around the Tsushima Islands in Japan. *Remote Sensing*, 9(7), pp. 762-775.
- Yildiz, H. et al., 2013. Estimates of vertical land motion along the southwestern coasts of Turkey from coastal altimetry and tide gauge data. *Advances in Space Research*, 51(8), pp. 1572-1580.

LISAD

Lisa 1. Kinemaatilisel ja RTK meetodil mõõdetud punktide võrdlus *Start*, *Validation* ja *Stop* punktides

<i>Start</i> punktis							
Kinemaatiliselt mõõdetud punktid				RTK stiilis mõõdetud punktid			
Punkti nr	X (m)	Y (m)	Z (m)	Punkti nr	X (m)	Y (m)	Z (m)
2055	6551472,705	466708,344	20,063	2342	6551473,685	466708,761	20,142
2056	6551472,653	466707,894	20,149	2343	6551473,646	466707,757	20,126
2057	6551472,681	466707,230	20,137	2344	6551473,730	466707,166	20,040
2058	6551472,835	466706,523	20,093	2345	6551473,889	466706,473	20,062
2059	6551473,096	466705,664	20,105	2346	6551474,190	466705,708	20,065
2060	6551473,574	466704,810	20,103	2347	6551474,615	466704,937	20,064
2061	6551474,104	466703,909	20,126	2348	6551475,189	466704,280	20,102
2062	6551474,877	466703,194	20,127	2349	6551475,791	466703,624	20,069
2063	6551475,641	466702,519	20,133	2350	6551476,582	466703,113	20,067
2064	6551476,600	466701,971	20,096	2351	6551477,434	466702,670	20,035
2065	6551477,618	466701,552	20,074	2352	6551478,364	466702,440	20,097
2066	6551478,699	466701,341	20,147	2353	6551479,375	466702,287	20,041
2067	6551479,849	466701,267	20,056	2354	6551480,362	466702,317	20,066
2068	6551480,962	466701,385	20,133	2355	6551481,351	466702,551	20,099
2069	6551482,087	466701,714	20,113	2356	6551482,301	466702,858	20,058
		Keskmine	20,110			Keskmine	20,076

Lisa 1 järg

<i>Validation punktis</i>							
Kinemaatiliselt mõõdetud punktid				RTK stiilis mõõdetud punktid			
Punkti nr	X	Y	Z	Punkti nr	X	Y	Z
4654	6569109,001	460336,797	20,052	4669	6569079,541	460370,904	20,123
4655	6569108,955	460336,937	20,023	4670	6569077,905	460372,432	20,090
4656	6569108,864	460337,024	20,014	4671	6569076,809	460373,535	20,157
4657	6569108,773	460337,162	20,050	4672	6569075,769	460374,761	20,113
4658	6569108,687	460337,278	20,057	4673	6569074,110	460376,717	20,102
4659	6569108,575	460337,375	19,988	4674	6569073,087	460378,228	20,056
4660	6569108,548	460337,490	20,012	4675	6569071,885	460380,174	20,144
4661	6569108,451	460337,587	20,051	4676	6569070,709	460382,123	20,122
4662	6569108,369	460337,706	20,038	4677	6569070,122	460383,161	20,070
4663	6569108,273	460337,885	20,080	4678	6569069,449	460384,194	20,074
4664	6569108,171	460337,971	20,062	4679	6569068,870	460385,037	20,065
4665	6569108,105	460338,078	19,961	4680	6569067,942	460386,314	20,087
4666	6569108,007	460338,164	20,050	4681	6569067,118	460387,601	20,117
4667	6569107,968	460338,297	20,063	4682	6569066,129	460389,020	20,095
4668	6569107,849	460338,445	20,054	4683	6569065,288	460390,244	20,108
		Keskmine	20,037			Keskmine	20,102

Lisa 1 järg

Stop punktis							
Kinemaatiliselt mõõdetud punktid				RTK stiilis mõõdetud punktid			
Punkti nr	X	Y	Z	Punkti nr	X	Y	Z
2989	6549598,948	453169,851	20,183	3485	6549599,589	453169,035	20,026
2990	6549598,705	453169,717	20,087	3486	6549599,289	453168,820	20,117
2991	6549598,552	453169,441	20,215	3487	6549599,169	453168,567	20,113
2992	6549598,346	453169,245	20,145	3488	6549598,904	453168,400	20,101
2993	6549598,140	453169,054	20,171	3489	6549598,773	453168,135	20,083
2994	6549597,974	453168,795	20,151	3490	6549598,430	453167,691	20,049
2995	6549597,787	453168,610	20,138	3491	6549598,205	453167,530	20,148
2996	6549597,635	453168,349	20,147	3492	6549598,061	453167,255	20,042
2997	6549597,432	453168,181	20,197	3493	6549597,838	453167,096	20,138
2998	6549597,274	453167,893	20,116	3494	6549597,694	453166,837	20,076
2999	6549597,043	453167,767	20,186	3495	6549597,505	453166,661	20,092
3000	6549596,918	453167,457	20,140	3496	6549597,319	453166,432	20,085
3001	6549596,680	453167,351	20,153	3497	6549597,134	453166,196	20,102
3002	6549596,583	453167,025	20,144	3498	6549596,956	453166,050	20,152
3003	6549596,344	453166,916	20,121	3499	6549596,787	453165,754	20,080
		Keskmine:	20,153			Keskmine:	20,094

Lisa 2. Altimeetria ja veemõõdujaama veetaseme kõrguste võrdlused *Validation* ja *Stop* punktides (Sentinel-3A) ajavahemikus juuni 2016 kuni detsember 2018 ning *Start* punktis (Sentinel-3B) vahemikus detsember 2018 kuni märts 2019

Ülelennud 2016 <i>Validation</i> punktis								
<i>Kuupäev</i>	06. juuni	01. juuli	28. juuli	24. aug	20. sept	17. okt	13. nov	10. dets
<i>SSH_A</i>	19,92	19,94	20,07	20,18	20,02	19,77	19,98	20,34
<i>H_{Dirhami VMJ (EH2000)}</i>	-0,09	0,22	0,12	0,18	0,01	-0,508	0,21	0,36
<i>SSH_{Dirhami VMJ}</i>	19,63	19,94	19,84	19,90	19,73	19,21	19,93	20,08
<i>H_{HDM (VS)}</i>	0,01	0,10	0,16	0,36	0,08	-0,19	0,04	0,53
<i>H_{HDM (Dirhami VMJ)}</i>	-0,02	0,11	0,13	0,36	0,05	-0,20	0,04	0,52
<i>ΔHBM-EST</i>	0,03	-0,01	0,02	-0,01	0,03	0,02	0,00	0,01
<i>SSH_{geoid}</i>	19,81	20,08	20,02	20,05	19,92	19,38	20,09	20,23
<i>SSH_{GNSS}</i>	19,79	20,06	19,99	20,03	19,89	19,36	20,06	20,21
<i>SSH_A – SSH_{geoid}</i>	0,10	-0,14	0,06	0,13	0,11	0,39	-0,11	0,11
<i>SSH_A – SSH_{GNSS}</i>	0,12	-0,12	0,08	0,15	0,13	0,41	-0,09	0,13

SSH_A – Altimeetria kõrgus valideerimispunktis

H_{Dirhami VMJ (EH2000)} – Merepinna kõrgus Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel (EH2000)

SSH_{Dirhami VMJ} – Merepinna kõrgus ellipsoidist Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

H_{HDM (VS)} – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM-EST mudeli järgi valideerimispunktis ülelennu hetkel

H_{HDM (Dirhami VMJ)} – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM-EST mudeli järgi Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

ΔHBM-EST = Hetke merepinna topograafia parand, arvutatud *H_{HDM (VS)}* - *H_{HDM (Dirhami VMJ)}*

SSH_{geoid} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvutatud valemiga 3.3.

SSH_{GNSS} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvutatud valemiga 3.2.

Lisa 2 järg

Ülelennud 2017 <i>Validation</i> punktis													
<i>Kuupäev</i>	06.jaan	02.veebr	01.märts	28.märts	24.apr	21.mai	17.juuni	14.juuli	10.aug	06.sept	03.okt	30.okt	26.nov
<i>SSH_A</i>	20,45	20,14	20,05	20,07	20,22	20,13	21,08	20,26	20,19	20,03	19,92	20,20	20,37
<i>H_{Dirhami VMJ}</i> <i>(EH2000)</i>	0,462	0,14	0,22	0,15	0,307	-0,03	0,262	0,64	0,23	-0,06	0,02	0,35	0,41
<i>SSH_{Dirhami VMJ}</i>	20,18	19,86	19,94	19,87	20,03	19,69	19,98	20,36	19,95	19,66	19,74	20,07	20,13
<i>H_{HDM}</i> (VS)	0,62	0,25	-	0,35	0,56	0,09	0,33	0,47	0,34	0,26	-0,10	0,56	0,56
<i>H_{HDM}</i> <i>(Dirhami VMJ)</i>	0,59	0,25	-	0,36	0,56	0,09	0,32	0,48	0,34	0,22	-0,11	0,53	0,56
<i>ΔHBM-EST</i>	0,03	-0,01	-	-0,01	0,00	0,00	0,01	-0,02	0,00	0,04	0,01	0,03	0,00
<i>SSH_{geoid}</i>	20,36	20,00	20,09	20,01	20,18	19,84	20,14	20,49	20,10	19,84	19,90	20,25	20,28
<i>SSH_{GNSS}</i>	20,34	19,98	20,07	19,98	20,16	19,82	20,12	20,47	20,08	19,82	19,88	20,23	20,26
<i>SSH_A</i> – <i>SSH_{geoid}</i>	0,10	0,14	-0,04	0,06	0,05	0,29	0,94	-0,23	0,09	0,18	0,02	-0,05	0,09
<i>SSH_A</i> – <i>SSH_{GNSS}</i>	0,12	0,16	-0,01	0,08	0,07	0,31	0,96	-0,21	0,11	0,20	0,04	-0,03	0,11

SSH_A – Altimeetria kõrgus valideerimispunktis

H_{Dirhami VMJ} (EH2000) – Merepinna kõrgus Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel (EH2000)

SSH_{Dirhami VMJ} – Merepinna kõrgus ellipsoidist Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

H_{HDM} (VS) – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM-EST mudeli järgi valideerimispunktis ülelennu hetkel

H_{HDM} (Dirhami VMJ) – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM-EST mudeli järgi Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

ΔHBM-EST = Hetke merepinna topograafia parand, arvatatud *H_{HDM}* (VS) - *H_{HDM}* (Dirhami VMJ)

SSH_{geoid} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvatatud valemiga 3.3.

SSH_{GNSS} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvatatud valemiga 3.2.

Lisa 2 järg

Ülelennud 2018 Validation punktis													
<i>Kuupäev</i>	19.jaan	15.veebr	14.märts	10.apr	07.mai	03.juuni	30.juuni	27.juuli	23.aug	19.sept	16.okt	12.nov	09.dets
<i>SSH_A</i>	20,04	20,02	19,79	19,76	20,18	19,76	20,04	19,98	20,22	20,13	20,29	20,10	20,04
<i>H_{Dirhami VMJ}</i> <i>(EH2000)</i>	0,22	0,02	-0,04	-0,17	0,09	-0,11	0,24	0,14	0,29	0,31	0,36	0,05	0,18
<i>SSH_{Dirhami VMJ}</i>	19,94	19,74	19,68	19,55	19,81	19,62	19,96	19,86	20,01	20,03	20,08	19,77	19,90
<i>H_{HDM}</i> (VS)	0,31	0,16	0,02	-0,07	0,18	-0,07	0,40	0,28	0,46	0,35	0,48	-	0,28
<i>H_{HDM}</i> (Dirhami VMJ)	0,30	0,15	0,02	-0,10	0,18	-0,06	0,36	0,28	0,48	0,39	0,50	-	0,28
<i>ΔHBM-EST</i>	0,01	0,01	0,00	0,03	0,01	-0,01	0,03	0,00	-0,02	-0,05	-0,02		0,00
<i>SSH_{geoid}</i>	20,10	19,90	19,83	19,73	19,96	19,76	20,14	20,01	20,14	20,13	20,21	19,92	20,05
<i>SSH_{GNSS}</i>	20,08	19,88	19,81	19,71	19,94	19,74	20,12	19,99	20,12	20,10	20,19	19,89	20,03
<i>SSH_A – SSH_{geoid}</i>	-0,07	0,12	-0,04	0,02	0,22	0,00	-0,10	-0,03	0,08	0,00	0,08	0,18	-0,01
<i>SSH_A – SSH_{GNSS}</i>	-0,05	0,14	-0,02	0,05	0,24	0,02	-0,08	-0,01	0,10	0,03	0,10	0,20	0,01

SSH_A – Altimeetria kõrgus valideerimispunktis

H_{Dirhami VMJ} (EH2000) – Merepinna kõrgus Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel (EH2000)

SSH_{Dirhami VMJ} – Merepinna kõrgus ellipsoidist Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

H_{HDM} (VS) – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM-EST mudeli järgi valideerimispunktis ülelennu hetkel

H_{HDM} (Dirhami VMJ) – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM-EST mudeli järgi Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

ΔHBM-EST = Hetke merepinna topograafia parand, arvutatud H_{HDM} (VS) - H_{HDM} (Dirhami VMJ)

SSH_{geoid} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvutatud valemiga 3.3.

SSH_{GNSS} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvutatud valemiga 3.2.

Lisa 2 järg

Ülelennud 2016 <i>Stop</i> punktis								
<i>Kuupäev</i>	6. juuni	1. juuli	28. juuli	24. aug	20. sept	17. okt	13. nov	10. dets
<i>SSH_A</i>	19,76	20,07	20,08	20,26	20,04	19,96	19,98	20,34
<i>H_{Dirhami VMJ (EH2000)}</i>	-0,09	0,22	0,12	0,18	0,01	-0,51	0,21	0,36
<i>SSH_{Dirhami VMJ}</i>	19,63	19,94	19,84	19,90	19,73	19,21	19,93	20,08
<i>H_{HDM (VS)}</i>	-0,01	0,11	0,13	0,36	0,06	-0,20	0,04	0,53
<i>H_{HDM (Dirhami VMJ)}</i>	-0,02	0,11	0,13	0,36	0,05	-0,20	0,04	0,52
<i>ΔHBM-EST</i>	0,01	0,00	0,00	-0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
<i>SSH_{geoid}</i>	19,85	20,15	20,05	20,10	19,95	19,43	20,15	20,30
<i>SSH_{GNSS}</i>	19,88	20,18	20,09	20,14	19,98	19,46	20,18	20,33
<i>SSH_A – SSH_{geoid}</i>	-0,09	-0,08	0,03	0,16	0,09	0,53	-0,16	0,04
<i>SSH_A – SSH_{GNSS}</i>	-0,12	-0,11	0,00	0,12	0,06	0,50	-0,20	0,01

SSH_A – Altimeetria kõrgus valideerimispunktis

$H_{Dirhami VMJ (EH2000)}$ – Merepinna kõrgus Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel (EH2000)

$SSH_{Dirhami VMJ}$ – Merepinna kõrgus ellipsoidist Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

$H_{HDM (VS)}$ – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM-EST mudeli järgi valideerimispunktis ülelennu hetkel

$H_{HDM (Dirhami VMJ)}$ – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM. EST mudeli järgi Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

$\Delta HBM-EST$ = Hetke merepinna topograafia parand, arvutatud $H_{HDM (VS)}$ - $H_{HDM (Dirhami VMJ)}$

SSH_{geoid} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvutatud valemiga 3.3.

SSH_{GNSS} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvutatud valemiga 3.2.

Lisa 2 järg

Ülelennud 2017 <i>Stop</i> punktis													
<i>Kuupäev</i>	06.jaan	02.veebr	01.märts	28.märts	24.apr	21.mai	17.juuni	14.juuli	10.aug	06.sept	03.okt	30.okt	26.nov
<i>SSH_A</i>	21,33	19,83	20,14	20,16	18,85	20,19	20,18	20,30	20,26	20,07	20,01	20,26	20,38
<i>H_{Dirhami VMJ} (EH2000)</i>	0,46	0,14	0,22	0,15	0,31	-0,03	0,26	0,64	0,23	-0,06	0,02	0,35	0,41
<i>SSH_{Dirhami VMJ}</i>	20,18	19,86	19,94	19,87	20,03	19,69	19,98	20,36	19,95	19,66	19,74	20,07	20,13
<i>H_{HDM (VS)}</i>	0,60	0,24	-	0,37	0,55	0,09	0,32	0,47	0,33	0,23	-0,13	0,59	0,56
<i>H_{HDM (Dirhami VMJ)}</i>	0,59	0,25	-	0,36	0,56	0,09	0,32	0,48	0,34	0,22	-0,11	0,53	0,56
<i>ΔHBM-EST</i>	0,01	-0,01	-	0,01	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	-0,01	0,01	-0,02	0,06	0,01
<i>SSH_{geoid}</i>	20,40	20,05	20,15	20,09	20,23	19,90	20,19	20,55	20,15	19,88	19,93	20,34	20,35
<i>SSH_{GNSS}</i>	20,43	20,09	20,18	20,13	20,27	19,93	20,22	20,59	20,19	19,91	19,96	20,38	20,38
<i>SSH_A – SSH_{geoid}</i>	0,93	-0,22	-0,01	0,07	-1,38	0,30	-0,01	-0,25	0,11	0,20	0,08	-0,08	0,03
<i>SSH_A – SSH_{GNSS}</i>	0,89	-0,25	-0,04	0,03	-1,42	0,26	-0,04	-0,28	0,07	0,16	0,05	-0,12	-0,01

SSH_A – Altimeetria kõrgus valideerimispunktis

H_{Dirhami VMJ} (EH2000) – Merepinna kõrgus Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel (EH2000)

SSH_{Dirhami VMJ} – Merepinna kõrgus ellipsoidist Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

H_{HDM (VS)} – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM-EST mudeli järgi valideerimispunktis ülelennu hetkel

H_{HDM (Dirhami VMJ)} – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM-EST mudeli järgi Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

ΔHBM-EST = Hetke merepinna topograafia parand, arvatud H_{HDM (VS)} - H_{HDM (Dirhami VMJ)}

SSH_{geoid} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvatud valemiga 3.3.

SSH_{GNSS} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvatud valemiga 3.2.

Lisa 2 järg

Ülelennud 2018 <i>Stop</i> punktis												
<i>SSH_A</i>	15.veebr	14.märts	10.apr	07.mai	03.juuni	30.juuni	27.juuli	23.aug	19.sept	16.okt	12.nov	09.dets
<i>H_{Dirhami VMJ}</i> (EH2000)	20,35	19,88	19,95	19,09	19,76	20,08	20,01	20,28	20,23	20,38	20,13	20,14
<i>SSH_{Dirhami VMJ}</i>	0,02	-0,04	-0,17	0,09	-0,11	0,24	0,14	0,29	0,31	0,36	0,05	0,18
<i>H_{HDM}</i> (VS)	19,74	19,68	19,55	19,81	19,62	19,96	19,86	20,01	20,03	20,08	19,77	19,90
<i>H_{HDM}</i> (Dirhami VMJ)	0,15	0,04	-0,09	0,18	-0,07	0,39	0,28	0,46	0,39	0,50	-	0,26
<i>ΔHBM-EST</i>	0,15	0,02	-0,10	0,18	-0,06	0,36	0,28	0,48	0,39	0,50	-	0,28
<i>SSH_{geoid}</i>	0,00	0,01	0,01	0,00	-0,01	0,03	0,00	-0,02	-0,01	0,00	-	-0,02
<i>SSH_{GNSS}</i>	19,95	19,90	19,77	20,01	19,81	20,19	20,06	20,20	20,23	20,29	19,97	20,09
<i>SSH_A – SSH_{geoid}</i>	19,99	19,94	19,81	20,05	19,85	20,22	20,10	20,24	20,26	20,33	20,01	20,13
<i>SSH_A – SSH_{GNSS}</i>	0,40	-0,02	0,18	-0,93	-0,06	-0,11	-0,05	0,08	0,00	0,08	0,16	0,05
<i>SSH_A</i>	0,36	-0,06	0,15	-0,96	-0,09	-0,15	-0,09	0,05	-0,04	0,05	0,13	0,01

SSH_A – Altimeetria kõrgus valideerimispunktis

H_{Dirhami VMJ} (EH2000) – Merepinna kõrgus Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel (EH2000)

SSH_{Dirhami VMJ} – Merepinna kõrgus ellipsoidist Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

H_{HDM} (VS) – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM-EST mudeli järgi valideerimispunktis ülelennu hetkel

H_{HDM} (Dirhami VMJ) – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM-EST mudeli järgi Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

ΔHBM-EST = Hetke merepinna topograafia parand, arvatatud *H_{HDM}* (VS) - *H_{HDM}* (Dirhami VMJ)

SSH_{geoid} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvatatud valemiga 3.3.

SSH_{GNSS} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvatatud valemiga 3.2.

Lisa 2 järg

Ülelennud <i>Validation</i> punktis					
<i>Kuupäev</i>	07.12.2018	03.01.2019	30.01.2019	26.02.2019	25.03.2019
<i>SSH_A</i>	20,07	20,24	20,01	20,10	20,29
<i>H_{Dirhami VMJ (EH2000)}</i>	0,03	0,14	0,17	0,16	0,37
<i>SSH_{Dirhami VMJ}</i>	19,75	19,86	19,89	19,88	20,09
<i>H_{HDM (VS)}</i>	0,09	0,42	0,38	0,28	0,50
<i>H_{HDM (Dirhami VMJ)}</i>	0,08	0,40	0,39	0,28	0,53
<i>ΔHBM-EST</i>	0,01	0,02	-0,01	0,00	-0,03
<i>SSH_{geoid}</i>	19,91	20,03	20,03	20,03	20,22
<i>SSH_{GNSS}</i>	19,89	20,01	20,01	20,01	20,19
<i>SSH_A – SSH_{geoid}</i>	0,16	0,21	-0,02	0,07	0,07
<i>SSH_A – SSH_{GNSS}</i>	0,18	0,23	0,00	0,09	0,09

SSH_A – Altimeetria kõrgus valideerimispunktis

$H_{Dirhami VMJ (EH2000)}$ – Merepinna kõrgus Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel (EH2000)

$SSH_{Dirhami VMJ}$ – Merepinna kõrgus ellipsoidist Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

$H_{HDM (VS)}$ – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM-EST mudeli järgi valideerimispunktis ülelennu hetkel

$H_{HDM (Dirhami VMJ)}$ – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM-EST mudeli järgi Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

$\Delta HBM-EST$ = Hetke merepinna topograafia parand, arvutatud $H_{HDM (VS)}$ - $H_{HDM (Dirhami VMJ)}$

SSH_{geoid} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvutatud valemiga 3.3.

SSH_{GNSS} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvutatud valemiga 3.2.

Lisa 2 järg

<i>Kuupäev</i>	Ülelennud <i>Start punktis</i>				
	07.12.2018	03.01.2019	30.01.2019	26.01.2019	25.03.2019
<i>SSH_A</i>	20,23	-7,41	20,20	20,18	20,49
<i>H_{Dirhami VMJ (EH2000)}</i>	0,03	0,14	0,17	0,16	0,37
<i>SSH_{Dirhami VMJ}</i>	19,75	19,86	19,89	19,88	20,09
<i>H_{HDM (VS)}</i>	0,06	0,41	0,39	0,28	0,56
<i>H_{HDM (Dirhami VMJ)}</i>	0,08	0,40	0,39	0,28	0,53
<i>ΔHBM-EST</i>	-0,02	0,01	0,00	0,00	0,03
<i>SSH_{geoid}</i>	19,93	20,07	20,09	20,08	20,32
<i>SSH_{GNSS}</i>	19,93	20,07	20,09	20,08	20,32
<i>SSH_A – SSH_{geoid}</i>	0,30	-27,48	0,11	0,10	0,17
<i>SSH_A – SSH_{GNSS}</i>	0,30	-27,47	0,11	0,10	0,17

SSH_A – Altimeetria kõrgus valideerimispunktis

$H_{Dirhami VMJ (EH2000)}$ – Merepinna kõrgus Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel (EH2000)

$SSH_{Dirhami VMJ}$ – Merepinna kõrgus ellipsoidist Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

$H_{HDM (VS)}$ – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM-EST mudeli järgi valideerimispunktis ülelennu hetkel

$H_{HDM (Dirhami VMJ)}$ – Merepinna kõrgus üle keskmise merepinna HBM-EST mudeli järgi Dirhami veemõõdujaamas ülelennu hetkel

$\Delta HBM-EST$ = Hetke merepinna topograafia parand, arvutatud $H_{HDM (VS)}$ - $H_{HDM (Dirhami VMJ)}$

SSH_{geoid} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvutatud valemiga 3.3.

SSH_{GNSS} – Merepinna kõrgus valideerimispunktis, arvutatud valemiga 3.2.

Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, Kadi Õunas,

(*autori nimi*)

sünniaeg 01.09.1994,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö
Satelliidi Sentinel-3 altimeetria andmete valideerimine Lääne-Eesti rannikulähedastel aladel,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on Aive Liibusk (PhD),
(*juhendaja(te) nimi*)

- 1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,
 - 1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja
 - 1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(*allkiri*)

Tartu, _____
(*kuupäev*)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(*juhendaja nimi ja allkiri*)

(*kuupäev*)

(*juhendaja nimi ja allkiri*)

(*kuupäev*)