

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Loodusteaduskond

Meresüsteemide Instituut

**AUTONOOMSE ALLVEELIUGURI ABIL HOOVUSE
KIIRUSE MÄÄRAMINE**

Bakalaureusetöö

Kai Salm

Juhendaja: Prof. Urmas Lips

Tallinn

2017

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud. Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Autor: Kai Salm

Allkiri:

Kuupäev:

Juhendaja: Professor Urmas Lips

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

Allkiri:

Kuupäev:

Kaitsmiskomisjoni esimees:

Nimi:

Allkiri:

Kuupäev:

RESÜMEE

Mereteaduses on teiste uurimismeetodite kõrval allveeliugur saanud oluliseks uurimisplatvormiks, kuna seade pakub võimalust jälgida ookeani piisava lahtuse ja ulatusega nii ajas kui ka ruumis. Seadmega on võimalik mõõta vee temperatuuri, soolsust, hoovuste kiirust, klorofüll *a* fluorestsentsi, akustilist ja optilist tagasihajumist, lahustunud hapniku ja nitraatide sisaldust ning passiivset akustikat. Seade opereerib vees pimenavigatsiooni abil. Navigatsioonisüsteem kasutab sisseehitatud GPS-vastuvõtjat koos asendi- ja sügavuseanduriga ning kõrgusmõõturit. Liugurit on võimalik kasutada hoovuste uurimiseks meres, võrreldes hinnatud ja mõõdetud asukoha koordinaate. Seejuures eeldatakse, et erinevus arvutatud asukoha ja seadme tegeliku asukoha vahel on tingitud hoovustest. Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituudil on kasutada *Teledyne Webb Research*'i poolt arendatud liugur Slocum G2. Allveeliuguriga on seni läbi viidud neli mõõdistuseksperimenti, millest 2016. aasta maikuu Kolga lahes teostatud mõõtmiste tulemusi on ka antud töös käsitletud. Taustaandmetena on kasutatud liuguri poolt registreeritud temperatuuri, soolsuse ja tiheduste vertikaalseid jaotusi, mille abil on leitud geostroofilised hoovuse kiirused. Analüüsitud on allveeliuguri andmetest saadud üle veesamba keskmistatud kiirusi ja geostroofilisi kiirusi ning nende muutusi ajas seoses tuule mõjuga

Allveeliugur, üle veesamba keskmistatud kiirus, geostroofiline kiirus

ABSTRACT „ESTIMATION OF CURRENT VELOCITY USING UNDERWATER GLIDERS“

Gliders are autonomous underwater vehicles, which have become important observation platforms in the ocean. They provide measurements with fine spatial and temporal resolution. A large number of sensors have been developed for gliders. It is possible to measure several physical parameters, like pressure, temperature, and conductivity to calculate salinity, and optical parameters, like optical backscatter, chlorophyll fluorescence, dissolved oxygen, and nitrate, but also passive acoustics. Most of the gliders are unable to determine their position underwater. Thus, the vehicle navigates to waypoints by dead-reckoned navigation. To provide dead reckoning, the navigation system uses a GPS receiver, altimeter, attitude and depth sensor. Underwater gliders can be used to measure current velocities. The vehicle is able to calculate a depth-averaged velocity between the two consecutive surface events using the difference between the estimated and GPS confirmed coordinates of the point of emersion. Department of Marine Systems at the Tallinn University of Technology has a Slocum G2 Glider developed by Teledyne Webb Research. The department has carried out four experiments using the glider. In this paper, the analysis is based on data collected in the Kolga Bay in May 2016. The depth-averaged current velocities calculated on the basis of flight and GPS data and geostrophic velocities estimated using the vertical profiles of density are analyzed. This study has an aim to demonstrate how the calculated depth-averaged and geostrophic velocities are related and to describe the effect of the wind on the currents in the studied coastal area.

Underwater glider, depth-averaged velocity, geostrophic velocity

SISUKORD

Resümees	3
Abstract „Estimation of current velocity using underwater gliders“	4
Sisukord	5
1. Sissejuhatus	7
1.1. Autonoomsed seadmed ja kaugseire	7
1.1.1. Argo triivpoid	8
1.1.2. <i>Ferrybox</i>	8
1.1.3. Poijaamad	8
1.1.4. Järelveetavad mõõteseadmed	9
1.2. Töö eesmärk	9
2. Allveeliugur	10
2.1. Töö põhimõte	11
2.1.1. Liikumine ja navigeerimine vees	11
2.1.2. Vastupidavus	12
2.1.3. Kommunikatsioon	13
2.1.4. Andmete talletamine	13
2.1.5. Andmete konverteerimine ja graafilised väljundid	14
2.2. Mida on võimalik mõõta	14
2.3. Näited liugurite kasutusvõimalustest	15
2.3.1. Keerised	15
2.3.2. Apvellingud	15
2.3.3. Füto- ja zooplankton ning muu hõljum	16
2.3.4. Passiivne akustika	16
2.4. Plussid ja miinused võrreldes teiste vahenditega	16
2.4.1. Liugurid ja laevad	17
2.4.2. Võimalikud esinevad vead	19
2.4.3. ADCP ja liuguri andmete võrdlus	20
3. Kiiruse määramise meetoodika	22
3.1. Liuguri poolt salvestatud andmed kiiruse arvutamiseks	23

4.	Mõõtmised Soome lahes	25
4.1.	Piirkonna iseloomustus.....	25
4.2.	Mõõdistuseksperiment.....	27
5.	Tulemused.....	29
5.1.	Meteoroloogiline taust.....	29
5.2.	Taustaandmed.....	30
5.2.1.	Temperatuur	31
5.2.2.	Soolsus	32
5.2.3.	Tihedus.....	33
5.3.	Vee liikumise iseloomustus.....	35
5.3.1.	Üle veesamba keskmistatud kiirus.....	35
5.3.2.	Geostroofilised kiirused	37
	Kokkuvõte.....	41
	Tänuavaldused.....	43
	Viidatud kirjandus.....	44
	Lisad.....	47
	Lisa 1	47
	Lisa 2.....	48
	Lisa 3.....	49
	Lisa 4.....	50

1. SISSEJUHATUS

Okeanograafia kui teadus põhineb suurel määral vaatlustel, sest teadlased ei saa kontrollida ookeanis toimuvaid protsesse ega neid uurimiseks isoleerida (Rudnick, 2016). Üheks keskseks probleemiks on suutmatus jälgida ookeani piisava lahutuse ja ulatusega nii ajas kui ka ruumis, mistõttu võivad olulised protsessid jääda märkamatuks. Näiteks arvamust, et suured tormid tõstavad produktiivsust oligotroofses avaookeanis, ei mõistetud enne, kui see oli mõõtmistega üsna juhuslikult kindlaks tehtud. Õigeaegselt ajastatud avaookeani ekspeditsioonidel merre paigutatud jaamad biooptiliste anduritega teostasid mõõtmisi ka siis, kui laev ei saanud enam merele jääda. Leitud muutused, mis torm fütoplanktoni kasvus põhjustas, aitasid kardinaalselt erinevaid hinnanguid ookeani globaalse produktiivsuse kohta, mis eelnevalt olid hinnatud, kas eraldiseisvatel diskreetsete määra mõõtmiste või toitainete kogubilansi põhjal, kokku viia. (Schofield et al., 2007)

1.1. Autonoomsed seadmed ja kaugseire

Okeanograafias on olulisteks uuringumeetoditeks mitmesuguste autonoomsete seadmete kasutamine ning kaugseire. Laevade ülalpidamine ja kasutamine on kulukas, mistõttu saab nende abil merekeskkonna seisundi kohta koguda teavet vaid piiratud ajaperioodidel ja aladel. Keskkonna olukorra hindamiseks ja usaldusväärsete järelduste tegemiseks on tarvis suurt hulka andmeid, mis oleks piisava katvuse, ulatuse ja lahutusega. Seega kombineerides erinevaid seire meetodeid ja andmete kogumise võimalusi, on seda võimalik saavutada. (Lips & Lips, 2013)

Läänemerel teostatakse kaugseiret satelliitidele paigaldatud andurite abil. Informatsiooni saab näiteks pinnakihi temperatuuri ja lainetuse parameetrite kohta. Kaugseire on kontaktmõõtmiste kõrval niivõrd oluline, sest andmed saadakse üsna lühikese aja jooksul suure mereala kohta. Ainult kontaktmõõtmiste abil ei ole

võimalik kirjeldada suure territooriumi hetkeolukorda, sest andmed lihtsalt ei ole piisava katvusega. Autonoomsete seadmetega kogutud andmed on aga kõrge lahutuse ja ulatusega. Käesolev töö keskendub allveeliugurite tutvustamisele, kuid lisaks neile on mereteaduses laialt levinud mõtteseadmeteks Argo triivpoid, merepõhja paigutatud sondeerivad mõõtekompleksid, erinevate anduritega poijaamad, *Ferrybox*'id ja järelveetavad mõõteriistad. (Lips & Lips, 2013)

1.1.1. Argo triivpoid

Argo triivpoi on autonoomne mõõteriist, mis teostab mõõtmisi merepinnast allpool. Triivpoi on sobilik avaookeanis kasutamiseks ning seade mõõdab veetemperatuuri ja soolsust. Eelnevalt programmeeritud poid lastakse vette uurimislauvalt, kuid neid on võimalik merre paigaldada ka lennukilt. Seade triivib ookeanis koos hoovustega kuni energiavarude lõppemiseni. Tavaliselt on ühe poi eluiga mitu aastat (vt lisa 1). (The Euro Argo ERIC, 2016)

1.1.2. *Ferrybox*

Ferrybox'id on automaatsed seadmed, mis paigaldatakse reisi- ja kaubalaevadele. Seade kujutab endast mõõtesüsteemi, millest merevesi läbi pumbatakse. *Ferrybox*'iga on võimalik saada vaid pinnakihi andmed, sest vett võetakse nelja kuni viie meetri sügavuselt. Seade on madalate ülalpidamiskuludega ning tänu laevaliikluse regulaarsusele on võimalik saada hea katvusega andmeid. (Lips & Lips, 2013)

1.1.3. Poijaamad

Eestis kasutati esimest korda profileerivat poijaama Soome lahes 2009. aasta suvel (Liblik & Lips, 2012). Poijaam teostab mõõtmisi iga kolme kuni kuue tunni järel mere pinnakihist kuni 50 meetri sügavuseni ja anduritega mõõdetakse temperatuuri, soolsust ja klorofüll *a* fluorestsentsi. Seade edastab andmed iga profiili mõõtmise

järel. Aegajalt tuleb andureid kalibreerida, mille tarbeks võetakse poijaama lähedalt regulaarselt eri sügavustelt proove. (Lips & Lips, 2013)

1.1.4. Järelveetavad mõõteseadmed

Järelveetavate mõõteseadmete abil on võimalik registreerida merekeskkonda iseloomustavate parameetrite vertikaalseid profiile (vt lisa 2). Nende seadmete eeliseks on lühikese ajaga saadud kõrge lahutusega järjestikused profiilid, mille saamiseks ei pea laev seisma jääma. Seadet juhitakse vahetult pardaarvutist mõõtmiste ajal. Andmeid saab koguda temperatuuri, soolsuse, klorofüll *a* fluorestsentsi ja fükotsüaniini, mis on tsüanobakterites esinev pigment, kohta. (Lips & Lips, 2013)

1.2. Töö eesmärk

Käesoleva töö eesmärk on kirjeldada autonoomse allveeliuguri ehk *glider*'i abil merekeskkonna parameetrite mõõtmise metoodikat ja spetsiifiliselt, kuidas on võimalik seadme andmetest määrata vee liikumise kiirust. Hoovuse kiiruseid on hinnatud 2016. aastal 4.-16. mail Soome lahes läbi viidud mõõdistuseksperimendi andmete põhjal.

2. ALLVEELIUGUR

Esimesena kirjeldas allveeliugurit detailselt Doug Webb oma laboriraamatus 2/8/86 ning selle avaldas Henry Stommel 1989. aastal oma nägemuses futuristlikest ja nutikatest seadmetest (Schofield et al., 2007). Artikkel keskendus uutel tehnoloogiatel põhineva püsiva ookeani vaatluste süsteemi loomisele, tutvustades seadmeid, mida veerand sajandit tagasi veel ei eksisteerinudki (Jones, Allsup, & Decolibus, 2014). Kuigi ideede realiseerimine võttis aega, on nüüdseks allveeliugurid välja teenimas kõrget mainet (Schofield et al., 2007). Ühekümneandate algul testiti allveeliuguri esimest prototüüpi ning alates sellest ajast teostatakse seadmega merel järjest rohkem vaatlusi ja uuringuid. Seadme kiire levik näitab, et allveeliuguriga kogutud andmete kasutusala ja rakendamise võimalused on laialdased. (Liblik et al., 2016)

Algselt kasutati liugureid kindlate okeanograafiliste protsesside vaatlemiseks. Seejärel sai seade suure tähelepanu osaliseks eri riikide merevägede poolt, mis aitas kaasa selle kiirele tehnoloogilisele arengule. (Liblik et al., 2016) Tugeva tõuke sai allveeliuguri arendamine tänu USA mereväe uuringutekeskus ONR (*Office of Naval Research*) strateegilisele rahastamisele, mille tulemusena arendati välja paralleelselt kolm enim levinud allveeliuguri tüüpi: Spray, arendatud *Scripps Institution of Oceanography* ja *Woods Hole Oceanographic Institution* poolt; Seaglider, arendatud *University of Washington* poolt; Slocum, arendatud *Webb Research* poolt. Nüüdseks on arendatud ka teisigi liuguri tüüpe, kuid need kolm on okeanograafilises teadustöös kõige laialdasemalt kasutatavad. (Rudnick, 2016) Kahekümnes eri riigis on 70 kasutajagruppi, kelle käsutuses on *Teledyne Webb Research*'i poolt pakutavad üle poole tuhande Slocum Glider'i. (Jones et al., 2014)

Olenevalt seadistusest ja patarei võimsusest võib allveeliuguri üks missioon kesta kuni mitu kuud. Liugurile on võimalik paigutada palju andureid, mis mõõdavad erinevaid füüsikalisi ja biokeemilisi parameetreid. Allveeliugurit on võimalik

kasutada madalates rannikuvetes, ohtlikus keskkonnas ja operatiivseireks. (Liblik et al., 2016) Eriti hästi sobib seade rannikumere uurimiseks, kuid nende teekonna ulatus võimaldab uurida ka ranniku ja avamere vahelist osa. Seetõttu kasutatakse liugureid tihti saartel, mis võimaldab ligipääsu avamere protsessidele. (Rudnick, 2016) Allveeliugureid kasutades on võimalik ookeani uurimist potentsiaalset edasi arendada (Schofield et al., 2007).

2.1. Töö põhimõte

Slocum Glider on autonoomne allveeliugur, millel on tiivad. Seade ei vaja propellerit, sest edasiliikumise tagab ujuvuse varieerimine. Seega vertikaalsihis toimub seadme liikumine ruumala muutumise läbi ning horisontaalsihis tänu külgedel paiknevatele tiibadele. (Hussain, Arshad, & Mohd-Mokhtar, 2011; Rudnick, 2016) Allveeliuguri tiivad on suunatud 45-kraadise nurga all tahapoole ning on kergesti väljavahetatavad (Teledyne Webb Research, 2012). Seade on torpeedokujuline, 1,8 meetrit pikk ning liigub mööda saehambakujulist trajektoori kiirusega 20-30 cm/s (Schofield et al., 2007).

2.1.1. Liikumine ja navigeerimine vees

Navigatsioonisüsteem suunab allveeliugurit liikuma mööda talle ette antud trajektoori. Seadme kallet kontrollitakse mahu muutuse ja sisemise massi ümberjaotamise kombinatsioonina. (Rudnick, 2016) Sukeldumise jaoks tõmmatakse liuguri ninaosas asuvat kolbi sissepoole, mis muudab seadme ruumala väiksemaks (ehk seadme raskemaks) ning seadme tõusmisel toimib mehhanism vastupidiselt, et liugur kergemaks teha (Teledyne Webb Research, 2012). Massikeskme ümberjaotamine toimub kere sees umbes kümne kilogrammise patareide ploki asukoha muutmise teel, et saavutada 26-kraadine laskumis- või tõusunurk (Rudnick, 2016; Teledyne Webb Research, 2012). Telje kallet kontrollitakse, kas patareide paki

paigutamisel teljest ühele või teisele poole või kohandades saba küljes olevat tüüri (Rudnick, 2016).

Seade opereerib vees pimenavigatsiooni abil, mille teeb võimalikuks liuguri navigatsioonisüsteem, mis kasutab sisse ehitatud GPS-vastuvõtjat koos asendi- ja sügavuseanduriga ning kõrgusmõõturit (Schofield et al., 2007). See tähendab, et liugur määrab oma teekonna missioonifailis ette antud sügavuste ja kõrguste järgi. Missioonis määratakse periood, mille järel seade tõuseb pinnale, et edastada andmed läbi satelliidi. Samas võtab see vastu oma GPS-koordinaadid antud ajahetkel, võrdleb neid arvutatud koordinaatidega ja vajadusel korrigeerib oma trajektoori. Erinevuse arvestusliku pinnale tõusu asukoha ja tegeliku positsiooni vahel on tingitud peamiselt hoovustest, mida seade arvestab arvutustes järgmisel missiooni lõigul. (Teledyne Webb Research, 2012)

2.1.2. Vastupidavus

Allveeliuguri silindriline kere koosneb kolmest osast ning lisaks moodustavad seadme esi- ja tagaosa kaks koonilist veega täituvat sektsiooni. Taolise viieosalise disaini plussiks on selle lihtsus, ökonoomsus ja avarus (Hussain et al., 2011; Teledyne Webb Research, 2012). Leelispatareid peavad vastu 25 kuni 50 päeva. Päevas liigub seade horisontaalsihis keskmiselt 24 kilomeetrit. Missiooni kestust mõjutavad oluliselt andurite arv, nende funktsioonid ning vee sügavus. Kõige rohkem nõuab liuguris voolu pumba töö, mistõttu on patarei eluiga kõige lühem madalates meredes. Siiski peab seade seal vastu üle kolme nädala ja jõuab teha mitu tuhat vertikaalset mõõtmist. (Schofield et al., 2007)

Slocum Glider'i kereosad on tehtud 6061 T6 alumiiniumist (Teledyne Webb Research, 2012). Alumiiniumi sulameid hinnatakse nende väikse tiheduse, suure tugevuse ja kõrge korrosiooni vastupanuvõime pärast ning 6xxx seeria sulamid on alumiiniumi sulamitest ühed tugevaimad (Lacki & Derlatka, 2017).

2.1.3. Kommunikatsioon

Raadiosagedusmodem või globaalne satelliittelefoni teenus Iridium tagab kahepoolse kommunikatsioonisüsteemi. Tagavara positsiooni- ja suhtlussüsteemi tagab Argos saatja. Et signaale oleks võimalik vastu võtta, asuvad kõik antennid saba kiilus, mis ulatub veest välja, kui seade iga kindlaksmääratud intervalli järel pinnale tõuseb. Programmeerimiskeele Java abil kirjutatud *Dockserver* on Linuxi põhine kommunikatsioonikeskus. See tegeleb seadme andmevahetustega ning hoiustab andmeid. Kui allveeliugur tõuseb pinnale, siis signaal, mis saadetakse välja läbi raadiosagedusmodemi või Iridiumi, võtab vastu seadmega seotud arvuti *Dockserver*. Samuti on liugurit võimalik seadistada saatma missiooni jooksul teateid oma tegevuse kohta e-mailile. (Schofield et al., 2007)

2.1.4. Andmete talletamine

Allveeliugur töötab kahe protsessori abil. Esimene tegeleb missiooni navigeerimise ning andurite tehniliste andmete talletamisega. Teine on teadusprotsessor, mis kontrollib seadme külge paigaldatud andurite komplekti ning salvestab nende andmed. (Kerfoot, 2014) Liugur salvestab faile erinevate laienditega. Laiend annab aimu andmetest, mida konkreetne fail sisaldab. Ära on määratud mahukad failid, mida üldjuhul missiooni jooksul üle ei kanta. (Teledyne Webb Research, 2012) ning ülejäänud failid kujutavad endast suuremahuliste failide väiksemaid alamhulki (Kerfoot, 2011), kuna faili maht määrab olulisel määral ära andmete ülekandeks kuluva aja (Teledyne Webb Research, 2012). Failid on protsessorite vahel jaotatud paarideks, millest iga paar sisaldab faili liuguri enda ja missiooni andmetega ning teist faili anduritelt saadud andmestikuga (Kerfoot, 2014). Igale seadme failitüübile reisiprotsessoris vastab teadusprotsessoris sarnane failitüübi laiend (Teledyne Webb Research, 2012).

2.1.5. Andmete konverteerimine ja graafilised väljundid

Dockserver automatiseerib failide ülekannet ja andmete talletamist. Kasutajal on võimalik kohaldada edastatavate andmete kogust, mis oleneb missiooni olemusest ja konkreetsest vajadusest. (Teledyne Webb Research, 2012) Peale failide ülekandmist seadmest arvutisse on vaja binaarfailid konverteerida *ASCII* tekstfailiseks ja ühendada vastavate logifailidega. See on vajalik, et saada tehnilised, reisi ja andurite andmed kokku ühte faili. Failide konverteerimine kujutab endast tegelikult paljude sammudega protsessi, mille eesmärgiks on andmete avalikustamine. (Kerfoot, 2011) Edasi on võimalik andmetöötlust jätkata näiteks MATLAB keskkonnas. Liuguri andmetest graafiliste väljundite saamiseks võib kasutada programmi *Ocean Data View* (ODV), mis on tarkvarapakett okeanograafiliste ja georefereeritud andmete graafiliseks kujutamiseks (Schlitzer, 2016) (vt lisa 3).

2.2. Mida on võimalik mõõta

Et allveeliuguril oleks võimalik vees opereerida, kehtivad külge paigaldatavatele anduritele erinevad suuruse ja võimsuse piirangud. Sellegipoolest on välja arendatud märkimisväärne hulk andureid. (Rudnick, 2016; Rudnick, Davis, Eriksen, Fratantoni, & Perry, 2004) Andurite paigaldamiseks mõeldud sektsioon on 12 tolli (30,48 cm) pikk ning selle kandevõime on kolm kuni neli kilogrammi (Teledyne Webb Research, 2012). Anduritega on võimalik mõõta temperatuuri, soolsust, hoovuste kiirust, klorofüll *a* fluorestsentsi, mis annab informatsiooni fütoplanktoni biomassi kohta, ning akustilist tagasihajumist, mis annab informatsiooni muuhulgas ka zooplanktoni kohta. Lisaks on võimalik mõõta lahustunud hapniku ja nitraatide sisaldust, optilist tagasihajumist, passiivset akustikat ning mere mikrostruktuuri. (Rudnick, 2016; Rudnick et al., 2004)

Kõiki vajalikke parameetreid ei ole võimalik aga otse mõõta. Üks olulisi parameetreid, mida mõõtmiste tulemusel saada tahetakse, on merevee soolsus,

mistõttu enim kasutatav andurite komplekt mõõdab rõhku, temperatuuri ja elektrijuhtivust, ning soolsus leitakse arvutuslikul teel. (Rudnick, 2016) Mida laiemaks muutub erinevate andurite hulk, seda enam hinnatakse allveeliuguriga tehtavaid mõõtmisi. Andurite puhul on kõige tähtsam hoida nende suurus ja energiatarve minimaalne. Palju sensoreid on muutunud juba standardseteks. Seega on neid täiendatud paljude erinevate optiliste anduritega, nagu multispektraalsed kiirgusmõõtjad ja hüperspektraalsed absorptsiooni mõõtjad. (Schofield et al., 2007)

2.3. Näited liugurite kasutusvõimalustest

2.3.1. Keerised

Allveeliugurid on sobivad keeriste uurimiseks, sest neid on võimalik seadistada liikuma mööda pöörise trajektoori ja jälgima selle arengut. Vajaduse korral võib teha korduvaid löikeid üle tugevamate gradientide. Lõuna-California lahes uuriti tsükloonaalset keerist ja leiti, et eufootilises vööndis oli toitainete allikaks kõrgemale tõusnud isopüknid (samatiheduspinnad) keerise keskmes. Järeldust toetas kõrgema klorofüllü kontsentratsiooni esinemine antud kohas. (Rudnick, 2016)

2.3.2. Apvellingud

Allveeliugurid sobivad hästi kontinentaalses šelfimeres toimuvate protsesside uurimiseks. Apvellingu süsteeme on uuritud ookeanide idaranniku hoovustes. Need suhteliselt laiad ja aeglased hoovused kannavad endaga külma vett kõrgematelt laiuskraadidelt madalamatele. Seega fundamentaalseks probleemiks on soojuse transport üle šelfi, mille põhjustab rannikust eemalduva pinnavoolu ja ranniku poole voolava pinnaaluse voolu kombinatsioon. ADPC-ga varustatud liuguritega näidati, et tagasivool on täpselt pinnapealse Ekmani kihi all, mistõttu on soojuse voog väiksem võimalikust, kui tagasivool ulatuks põhjani. (Rudnick, 2016)

2.3.3. Füto- ja zooplankton ning muu hõljum

Biokeemilise mudeli ja allveeliuguri andmete abil on võimalik uurida tuule mõjul toimuva vee segunemise mõju fütoplanktoni kasvule. Optilise tagasihajumise anduritega varustatud seadmega on leitud, et kontinentaalse šelfimere kohal tekkivad tormid põhjustavad piisavalt tugevaid voolusid, et ookeani põhjas olevaid setteid liikuma panna. Orkaan Sandy põhjustas muljetavaldava resuspensiooni, mida oli võimalik liugurite kogutud andmete põhjal vaadelda. (Rudnick, 2016) Absorptsiooni ehk neeldumise mõõtmised annavad informatsiooni fütoplanktoni taksonite ja detriidi kohta. Kui leitakse võimalus miniaturiseerida kineetiline klorofüll-*a* fluoromeeter, oleks liuguriga võimalik mõõta fotosünteesilist efektiivsust, mis annab informatsiooni fütoplanktoni füsioloogilise seisundi kohta. (Schofield et al., 2007)

2.3.4. Passiivne akustika

Allveeliugurid on suhteliselt vaiksed seadmed ning sobivad seega hästi passiivse akustika tuvastamiseks. USA idarannikul Maine lahes leiti liugurite gruppi kasutades, et Põhjjavaala (*Balaenoptera borealis*) häämitsuste päevane tsükkel on kooskõlas nende toiduks olevate aerjalaliste vertikaalse liikumisega. (Rudnick, 2016)

2.4. Plussid ja miinused võrreldes teiste vahenditega

Olles veel mõnda aega tagasi alles uudsed seadmed, on liugurid tõestanud enda väärtust, pakkudes uusi võimalusi ookeani uurimiseks. Liuguritega on võimalik teha kindla aja ja pikkusega mõõtmistsükleid. Allveeliugur on üsna kompaktne ja kerge seade, mistõttu on seda võimalik vette lasta nii väiksel jäiga kerega kummipaadilt kui ka suuremalt uurimislavalt. Võimalus liugurit vette lasta just väiksel lavalt on kulude kokkuvõtte silmas pidades väga oluline. Samuti on seadme eeliseks selle efektiivne ujuvus-süsteem, stabiilne liuglemine ning võime tagada püsivaid ruumilisi vaatlusandmeid. Liugurid on kõige väärtuslikumad siis, kui seadmed suudavad anda

kõrge horisontaalse resolutsiooniga püsivaid vaatlusandmeid säästlikumalt kui teised mõõtesüsteemid. (Rudnick, 2016)

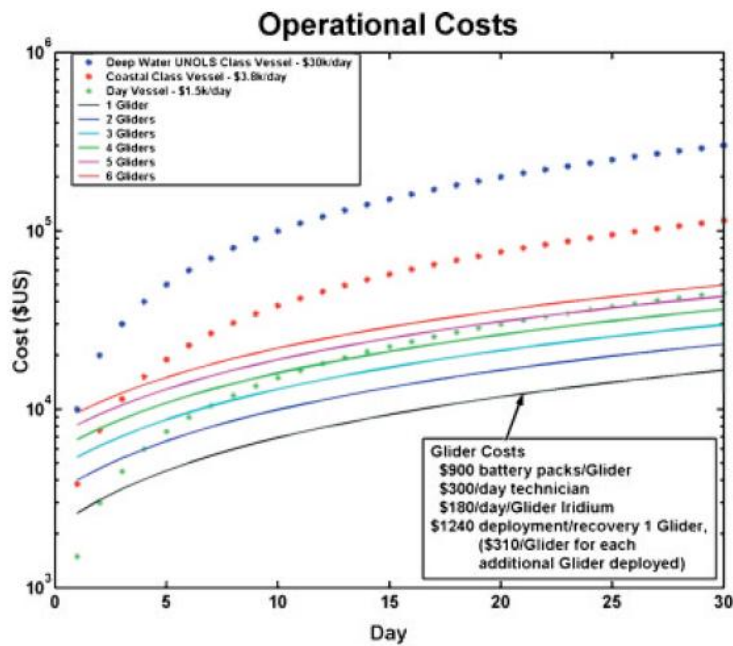
Esmapilgul võib tunduda, et allveeliugur on aeglane, kuid samas võtavad kõik mereuuringud aega. Näiteks põhiteadmiste omandamine maailmamere tsirkulatsiooni kohta võttis aega kuid ning frontide ja keeriste uurimiseks kulub kaasaegseid veetavaid mõõteseadmeid kasutades päevi. Miski ei toimu hetkeliselt. Näiteks satelliidil, mis mõõdab merepinna kõrgust, kulub 10 päeva kogu ookeani katmiseks. Ühesõnaga inimkonna võimalused ookeanist kujutuse saamiseks mingil ajahetkel on piiratud. Allveeliuguri suhteliselt väike liikumiskiirus võib aga osutada puuduseks kõrgsageduslike protsesside, nagu siselainete või mikrostruktuuri, uurimisel. Ka ei ole liugureid kasutatud eriti ekvatoriaalses avaookeanis, mille põhjuseks on suur vahemaa, sest seade vajab siiski veeskamist uurimislaevalt või saarelt. Uutele kasutajatele võib esmapilgul tunduda miinusena kasutatava tehnoloogia keerulisus. (Rudnick, 2016)

2.4.1. Liugurid ja laevad

Teadlased on juba sajandeid tuginenud just laevadelt kogutud andmetele ja vaatlustele. Uurimisretked on aidanud inimkonnal omandada teadmisi globaalsest vee tsirkulatsioonist, mesomastaapsete protsessidega seotud energiast ja ookeani globaalsest produktiivsusest. Kuigi uurimisretked on suurendanud teadmisi ookeanis toimuvatest protsessidest, on see viinud tõdemuseni, et ainult laevadelt ei ole võimalik teostada vajalikus ulatuses proovivõttusid, mis toetaksid sobivaid aja- ja ruumiskaalasid. Lahenduseks oleksid erinevad mobiilsed platvormid. (Schofield et al., 2007)

Kõikide teadustöödega kaasnevad erineva suurusega kulutused. Joonisel 1 on kujutatud laevade ja allveeliuguritega seotud ülalpidamiskulud. Laeva kulude all on mõeldud keskmist päevast kulu, mis varieerub olenevalt laevaklassist. Liuguri kulud sisaldavad veeskamise, väljavõtu ning hoolduskulutusi merel, sealhulgas patarei ja

Iridium side hinnad. Võrreldes uurimislavade maksumusega on ühe või kahe allveeliuguriga missioonide teostamine igal juhul ökonoomsem. Tüüpilise avaookeani ja rannikumere uurimislava töökulud ületavad isegi kuue liuguriga töögrupi mitme nädala pikkuse missiooni kulud esimesel nädalal. Koordineeritud liugurite grupe kasutatakse tihti ookeanist täieliku biokeemilise pildi saamiseks, kuna ühe seadme kandevõime ja energiatarve on piiratud. Mida rohkem andureid kasutatakse, seda suurem on nende energiatarve. Üks tehnik suudab korraga hallata mitut allveeliugurit, mistõttu mitme seadme kasutamisel suurenevad kulutused ainult sisse- ja väljavõtu, patareide ning Iridium ühenduse kulude arvelt. (Schofield et al., 2007)



Joonis 1. Laevade ja liugurite ülalpidamiskulud US dollarites. (Schofield et al., 2007)

Kuigi allveeliugurid ei hakka kunagi asendama laevadelt tehtavat uurimistööd, võimaldab autonoomsete seadmete kasutamine kokku hoida kulutusi ja aega, mida saab kasutada näiteks uute seadmete testimiseks, eksperimentide läbi viimiseks või andmete analüüsimiseks. (Schofield et al., 2007)

2.4.2. Võimalikud esinevad vead

Allveeliuguri töös võib esineda tehnilisi probleeme, mille puhul käivitab seade automatiseeritud missiooni katkestamise. See kujutab endast käskude jada, mis määrab liuguri edasise tegevuse vastavalt probleemi tõsidusele. Tegelikult on kõige sagedasemad katkestused üsna väiksed ning segavad missiooni kulgu vaid lühiajaliselt. Sellisteks probleemideks võivad olla seadme süsteemis esinevad viivitused, käitumisvead või ühenduse katkestused. Antud probleemide lahendamiseks alustab liugur käesoleva missiooni järgmist lõiku ning jätkab liikumist ettenähtud pöördepunkti poole. Katkestusele järgneval pinnale tõusul saadetakse Iridium ühenduse kaudu probleemi põhjus ja informatsioon seadme olukorra kohta tehnikule, kes otsustab edasise tegevuse üle. Tõsisemad probleemid, nagu seadme vead ja lekked, esinevad harvem. Seadme enda vead esinevad tavaliselt mootori või pumba töö häiretel, madala patarei pinge või andurite vigade, nagu kõrgusmõõduri või rõhuanduri vale näidu, korral. Selliste probleemide korral katkestab liugur kohe missiooni ning suundub veepinnale kasutajat teavitama. Seejärel on tehnikul võimalik alla laadida andmed, mille abil saab probleemi tõsiduse kindlaks teha, ning võimalusel seadistada taastamiseks paranduse või häälestuse. (Schofield et al., 2007)

On äärmiselt oluline, et allveeliuguri käitumist või missioonil esinevaid probleeme on võimalik korrigeerida. Sellisel juhul on kasutajal võimalik häälestada seadet nii, et liugur, kas jätkab missiooni, või kui see pole võimalik, siis püsida kontaktis järgmise võimaliku sammuni. Katkestuste esinemiste minimeerimiseks on koostatud juhendid, kindlustamaks seadme õige koormusjaotuse ja missiooniks ettevalmistuse. Samuti peab enne kasutamist kontrollima ja testitma kommunikatsioonisüsteeme, pumba ja mootori töökindlust ning tarkvara seadistusi. Lisaks tuleb plaanilise veeskamise asukoha kohta hankida võimalikult palju keskkonnaalast informatsiooni. Eriti puudutab see rannikuvetes varitsevaid statsionaarseid ohte, nagu pinna- või

veealused poid, laevateed, gaasi ja naftapuurtorid. Ka tuleb arvestada loodete ja tugevate hoovustega. (Schofield et al., 2007)

2.4.3. ADCP ja liuguri andmete võrdlus

Üle veesamba keskmistatud hoovuse kiirused võivad olla andmeanalüüsiks liiga üldistatud, eriti loodetest mõjutatud piirkondades. Hoovusi on võimalik mõõta ka akustilise Doppleri hoovuste profileerijaga (ADCP – *Acoustic Doppler Current Profiler*) varustatud liuguriga. Need on aga kallid ja üsna kõrge võimsustarbega. Seetõttu kasutatakse selle asemel laevadele kinnitatud ADCP-d, mis aga piirab mõõtmise ulatust ning mõõdetud hoovuste kiirused võivad liuguri poolt saadud andmetega mitte ühilduda. (Merckelbach, 2016)

Antarktika poolsaarest läänepoolset kontinentaalset šelfimered mõjutavad Antarktika ringhoovusest sissetungivad veemassid, mis toovad liustiku piirile suhteliselt sooja vett. Palmer Deep, Antarktika poolsaare lääneosas asuv bioloogiliselt väga produktiivse kanjoni piirkond, on üks kiiremini soojenevaid kohti maakeral, kuid temperatuuri tõus on pigem seotud ookeani kui atmosfääriga. (Couto, Schofield, & Kohut, 2016)

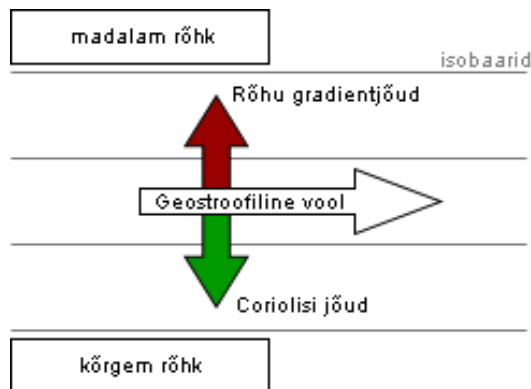
Suvekuudel, oktoobrist märtsini, tehakse USA Antarktika Programmi (*the United States Antarctic Program*) raames uurimisretki piki poolsaare rannikut. Üldiste tsirkulatsiooni mustrite kirjeldamiseks kasutati 2010. aastal korraldatud uuringus laeva kere külge paigaldatud ADCP-d, mille töösageduseks oli 38 kHz. Sellise sagedusega on võimalik mõõta hoovuse kiirusi vahemikus 46-1462 meetrit. Paralleelselt laevaga teostasid mõõtmisi liugurid. Kõik mõõtmised tehti mööda sama trajektoori. Allveeliugurid mõõtsid temperatuuri, soolsust ja rõhku, mille abil arvutati tihedus ja geostroofilised kiirused. Pimenavigatsiooni kaudu arvutati iga pinnale tõusu vahel üle veesamba keskmistatud hoovuse kiirus. (Couto et al., 2016)

Antud uuringus ei olnud võimalik teostada liuguri ja ADCP mõõtmisi samal ajal, kuid lähim seade lõpetas mõõtmise ööpäev enne laeva. Antud allveeliuguri andmetest arvatud üle veesamba keskmistatud geostroofiliste hoovuste kiirused osutusid kõige sarnasemaks ADCP poolt mõõdetud kiirustele. Selliseid mõõtmisi on üsna raske teostada samaaegselt, kuna liugur liigub laevast palju aeglasemalt ning seadmeid hoitakse kokkupõrgete vältimiseks laevadest võimalikult kaugelt. Geostroofilised hoovused tulid allveeliugurite mõõtmistes palju selgemalt esile, sest need olid tugevad just mere pinnakihis, kuid ADCP alustas mõõtmisi alles 46 meetri sügavusest. (Couto et al., 2016)

3. KIIRUSE MÄÄRAMISE METOODIKA

Hoovused võivad meres sügavuse kasvades oluliselt muutuda, kuid informatsiooni vee liikumise kohta on võimalik kasutada autonoomsete seadmete optimaalse trajektoori planeerimiseks ja navigeerimise parandamiseks. Tihti hinnatakse hoovuste kiirust kasutades allveeliuguri navigatsioonilist algoritmi. (Fan & Woolsey, 2014; Merckelbach, 2016) Koordinaatide erinevusest, mis tekib liuguri enda arvatud pinnale tõusmise punktide koordinaatide ja GPS-koordinaatide vahel, on võimalik leida üle veesamba keskmistatud kiirus. Sukeldumise jooksul arvutab liugur, teades oma liikumise suunda ja kiirust, välja pinnale jõudmise punkti koordinaadid. Pinnale tõusmisel kinnitab GPS lõpp-punkti tegelikud koordinaadid. Erinevus punktide vahel on tingitud hoovustest. (Yopak, 2007) Sellise meetodi kasutamine eeldab pimenavigatsiooni kõrget täpsust ehk erinevus GPS-parandi ja seadme enda leitud koordinaatide vahel on tingitud ainult vee liikumisest.

Lisaks kasutatakse kiiruse andmete piiratuse tõttu vee tsirkulatsiooni mustrite mõistmiseks geostroofiliste hoovuste arvutusi. Geostroofiliste hoovuste arvutused põhinevad geostroofilisel tasakaalul rõhugradiendi ja Coriolisi jõu vahel. Kahe asukoha vahel paneb ookeanis vee liikuma veetaseme ja tiheduste erinevus, mis toob kaasa ka rõhu erinevuse. Coriolisi jõud põhjustab liikumise pöörde, mille tulemusena voolab geostroofilises tasakaalus olev hoovus risti rõhugradiendiga (vt joonis 2). (Couto et al., 2016) Ilma maa pöörlemiseta liiguks vedelikud lihtsalt kõrgema rõhuga alalt madalama poole (Yopak, 2007).



Joonis 2. Geostroofilise voolu suund põhjapoolkeral.

3.1. Liuguri poolt salvestatud andmed kiiruse arvutamiseks

Allveeliugur hindab ja edastab kiiruse komponente, mis on suunatud itta ja põhja. Nende abil on võimalik leida üle veesamba keskmistatud vee liikumiskiirus. Allveeliuguri poolt arvatud kiirused on leitud ühe mõõtetsükli kohta ja keskmistatud üle kogu veesamba. Antud töös on võrdlemise aluseks võetud liuguri mõõdetud kiirused, kus seade teostas täis mõõtetsükli (vt ptk 4.2.) ning käis vähemalt ühe korra 80 meetri sügavusel. Arvestatud ei ole poolikute mõõtetsüklike ega väiksemate sügavuste kohta leitud keskmisi kiirusi. Poolikud mõõtetsüklid võivad tekkida näiteks ette juhtuvate pisivigade puhul (vt ptk 2.4.2.), kus seade mingil põhjusel liigub enne mõõtetsükli täis saamist pinnale.

Üle veesamba keskmistatud hoovuse kiirused leiab allveeliugur GPS-i positsioneerimisandmeid kasutades, kuid geostroofiliste kiiruste leidmiseks, on vaja vaadelda andurite poolt mõõdetuid andmeid. Geostroofilise hoovuse kiirus arvutatakse tiheduse jaotusest, mis leitakse mõõdetud temperatuuri ja soolsuse profiilide abil. Programm ODV tuletab geostroofilised kiirused kahe jaama dünaamiliste kõrguste erinevusest. (Schlitzer, 2016) Profiilid tuleb valida umbes viie kilomeetrise sammuga, kuna väiksemate ruumimastaapide juures ei pea geostroofiline tasakaal kehtima. Antud eksperimendis tegi allveeliugur mõõtmisi piki

lõiget, mistõttu on liuguri andmete põhjal võimalik leida lõikega risti olevat geostroofilist kiirust.

Dünaamilise meetodi abil on määrata geostroofiliste hoovuste jaotus, mis on kooskõlas mõõdetud tiheduse andmetega. Kuna samal ajal ei ole võimalik veetaseme hälbeid mõõta, siis põhineb meetod eeldusel, et nullnivool puudub geostroofiline liikumine ja horisontaalsed rõhu gradiendid. Nullnivoo valitakse olenevalt mere sügavusest ja eksperimendi eesmärgist – tihti näiteks sügavusel, kus tiheduse isojooned on ligikaudu horisontaalsed. Dünaamiline kõrgus ehk ülevalpool paikneva isobaari kõrgus arvutatakse nullnivoo (z_r) suhtes järgmiselt

$$D(z, z_r) = \frac{1}{\rho_0} \int_{z_r}^z (\rho(T, S, 0) - \rho(T_0, S_0, 0)) dz.$$

Valemis kujutatud $\rho(T, S, 0)$ on tihedus, mis on arvatud mõõdetud vee temperatuuri ja soolsuse profiilist. Dünaamiline kõrgus leitakse meetrites. Järgnevalt saab leida geostroofilise voolufunktsiooni

$$\Phi = \Phi(x, y, z) = \frac{g}{f\rho_0} \int_{z_r}^z \rho dz = \frac{g}{f} D(z, z_r).$$

Geostroofilised kiirused on võimalik leida valemite $u_g = -\frac{\partial\Phi}{\partial y}$ ja $v_g = \frac{\partial\Phi}{\partial x}$ abil.

(Elken, 2017) Kui algandmed paiknevad piki teatud sirglõiku, siis on võimalik nii hinnata ainult risti mõõdistuslõikega suunatud geostroogilise kiiruse komponenti.

4. MÕÕTMISED SOOME LAHES

Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituudil on uurimustööde läbiviimiseks kasutada *Teledyne Webb Research*'i allveeliugur Slocum G2 (vt pilt 1). Instituut on liuguriga kolme aasta jooksul läbi viinud neli uuringut. 2014. aastal teostati augustis mõõtmisi Muuga lahes. Osmussaare ja Hiiumaa vahelisel merealal, mis moodustab Soome lahe suudmeala, toimus uurimistöö 2015. aasta juulis ning sama aasta oktoobris kasutati seadet ka Gotlandi süvikus. 2016. aasta mais teostati mõõtmisi Keri saare ja Kolga lahe piirkonnas Soome lahes. (TTÜ Meresüsteemide Instituut, 2017) Viimasena nimetatud uuringute eesmärgiks oli kirjeldada termohaliinsete väljade muutlikkust ranniku- ja avamere vahelisel alal sesoone termokliini kujunemise perioodil.



Pilt 1. TTÜ MSI-s kasutusel olev liugur Slocum G2 „MIA“.

4.1. Piirkonna iseloomustus

Soome laht on 400 kilomeetrit pikk ja 48-135 kilomeetrit lai (Liblik & Lips, 2012). Vee tihedust mõjutavad olulisel määral nii temperatuur kui ka soolsus. Soolsust mõjutavad sademed, aurumine, jõgede sissevool ja veevahetus Läänemere avaosaga.

(Soomere, 2007) Läänes on Soome lahel otsene ühendus Läänemere avaosaga ja lahe idaosas domineerib magevee sissevool jõgedest, mistõttu on lahe idaosa lääneosast magedam. See tähendab, et tänu kirjeldatud veevahetusele kujunevad lahes välja ka soolsuse horisontaalsed ja vertikaalsed gradiendid. Samuti on väike erinevus soolsuses lahe lõuna- ja põhjaosa vahel, sest Eesti rannikul on soolsus veidi kõrgem kui Soome rannikul. (Liblik & Lips, 2012)

Ainete jaotust ja transporti mõjutab oluliselt veesamba vertikaalne stratifikatsioon (Liblik & Lips, 2012). Suvekuudel esineb Soome lahe sügavamatel aladel tugev vertikaalne kihistatus, mis jaotab veesamba kolmeks – ülemine segunenud veekiht, selle all külm vahekiht, ning põhjalähedane veekiht, mis on vahekihist soolasem ja veidi soojem. Veekihte eraldavad püknokliinid: termokliin, mis asub 10-20 meetri sügavusel, ja püsiv halokliin, mis asub 60-70 meetri sügavusel. (Liblik & Lips, 2012)

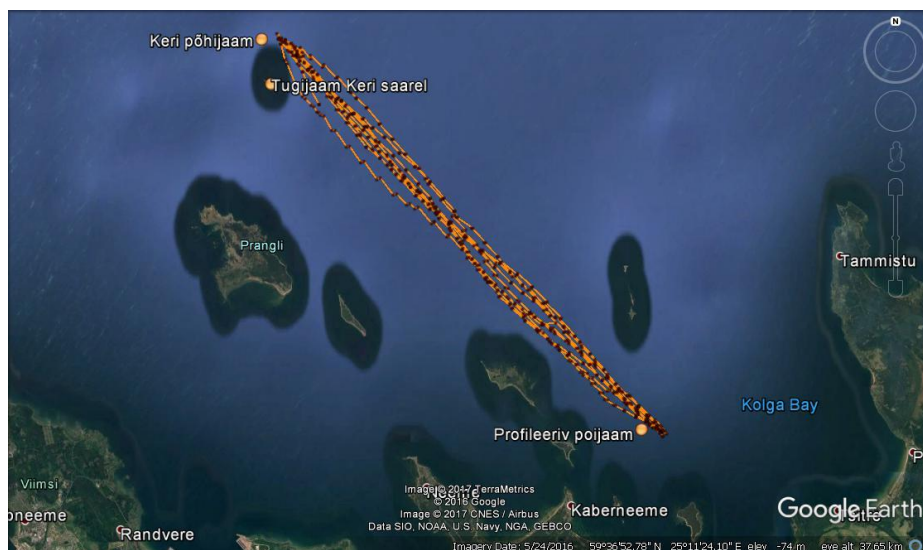
Tuule muutus ajas võib püknokliinide asukohta ja tugevust mõjutada, mistõttu on Soome lahe kihistumise väljakujunemist raske ette hinnata. Kindla ajahetke kihistumine sõltub suurel määral ka vee liikumisest risti lahte, mis võivad tekitada nähtuseid, nagu apvelling ehk süvaveeerge ja daunvelling ehk pealisvee sukeldumine. (Liblik & Lips, 2012) Ap- ja daunvelling on Soome lahes tegelikult sagedased nähtused. Mõnel juhul võib 38% lahe pinnakihi veest olla asendunud tõusuvooludega kaasneva veega (Liblik & Lips, 2012). Tõusuvoolud paigutavad ümber erineva temperatuuri ja soolsusega vett (Soomere, 2007). Apvelling toob pindmisesse eufootilisse vööndisse sügavamatest kihtidest toitainerikka vee (Väli, Zhurbas, Laanemets, & Elken, 2011).

Soome lahes põhjustab ap- ja daunvellinguid piki rannikut puhuv tuul. Coriolisi jõu tõttu on pinnakihi keskmine liikumissuund tuule suunaga risti ning piki randa puhuv tuul kannab olenevalt tuule suunast vett ranna poole või sellest eemale. Suviti domineerivad Soome lahel edela- ja läänetuuled, mistõttu võib eeldada, et tänu tuulest tingitud triivhoovusele kandub soe pinnavesi Soome poolt Eesti rannikule. (Soomere, 2007) Apvellingu välja kujunemiseks Soome lahes peaks tuul puhuma

ühel suunast vähemalt 60 tunni vältel (Väli et al., 2011). Lahe üldises veeringluses esineb tsüklonaalne muster. Välja kujuneb tugev Soome rannikuhoovus, mis on suunatud lahest välja, ja lahe lõunaosas on idasuunaline vool kogu veesambas. (Liblik & Lips, 2012)

4.2. Mõõdistuseksperiment

Allveeliugur kogus andmeid 4.-16.05.2016. Seadme trajektoor koosnes kahe fikseeritud punkti vahelisest 26 kilomeetri pikkusest lõikest (vt joonis 3), mida see läbis üheksa korda. Ühe mõõtmistsükli jooksul sukeldus seade kolm korda ning seejärel naases tagasi veepinnale (vt lisa 4). Igal sukeldumisel registreerisid andurid andmeid kord kahe sekundi jooksul ehk sagedusega 0,5 Hz. Seade mõõtis vee temperatuuri, soolsust, klorofüll-*a* sisaldust, lahustunud hapniku sisaldust ja hägusust pinnakihi kuni 80 meetri sügavuseni. Mõõtmistsükli lõpus edastas liugur satelliitide abil kindla hulga vajalikke andmeid tööparameetrite, nagu patarei pinge, veekindla korpuse rõhu ja mõõtmisandmete, kohta. Samal ajal fikseeris seade oma asukoha GPS-seadme abil.



Joonis 3. Allveeliuguri trajektoor kahe fikseeritud profileerija vahel.

Allveeliuguriga samal ajal teostasid mõõtmisi kaks fikseeritud profileerijat (Lips, Liblik, Lips, & Rünk, 2016). Üheks oli profileeriv poijaam (Idronaut s.r.l, Itaalia) ja teine profileeriv põhjajaam (Flydog Solutions, Eesti). Idronaut, autonoomne veesamba profileerija, paigaldatakse merre pinnapoi ja merepõhja kinnitatud ankrute abil (Liblik & Lips, 2012). Poijaamale oli ette antud vajalik sügavusvahemik vertikaalsete profiilide registreerimiseks ja seade teostas mõõtmisi neli korda päevas pinnakihist kuni 42 meetri sügavuseni ning andurid mõõtsid temperatuuri, soolsust ja klorofüll-*a* sisaldust. (Lips et al., 2016) Keri avamere püsijaam kujutab endast veealust mõõtekompleksi. Seadme energia varustamiseks ja sideme pidamiseks on oluline ühendus maismaaga. Seepärast on põhjajaam ühendatud Keri saarel paikneva tugijaamaga kaabli abil, läbi mille edastab jaam ka reaalsajas mõõtmisandmeid. (TTÜ Meresüsteemide Instituut, 2017) Eksperimendi ajal teostas jaam mõõtmisi kaheksa korda päevas pinnakihist kuni 100 meetri sügavuseni ning mõõtis temperatuuri, soolsust, klorofüll-*a* sisaldust, hapniku sisaldust ja vee hägusust (Lips et al., 2016).

Uurimisolaev Salme teostas piirkonnas mõõtmisi 4. mail, 10.-11. mail ning 16. mail, mõõtes temperatuuri, soolsuse, klorofüll-*a* sisalduse, hapniku sisalduse ja vee hägususe profiile ning võttes proove soolsuse, klorofüll-*a* sisalduse, hapniku sisalduse, toitainete sisalduse ja fütoplanktoni koosluse liigilise koosseisu analüüsiks.

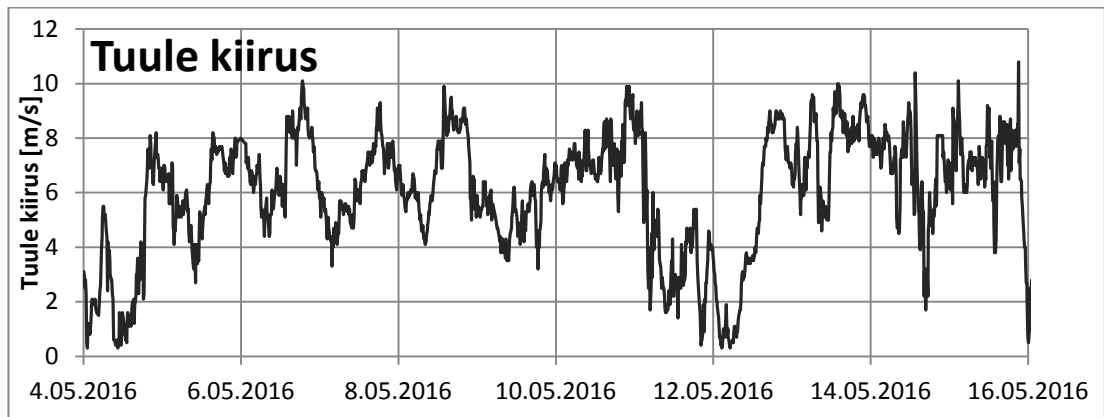
5. TULEMUSED

Antud lõputöös on kasutatud andmeid ajavahemikust 04-16.05.2016. Joonised andmete esitamiseks on tehtud programmidega Excel, Ocean Data View versioon 4.7.4 ja Google Earth.

5.1. Meteoroloogiline taust

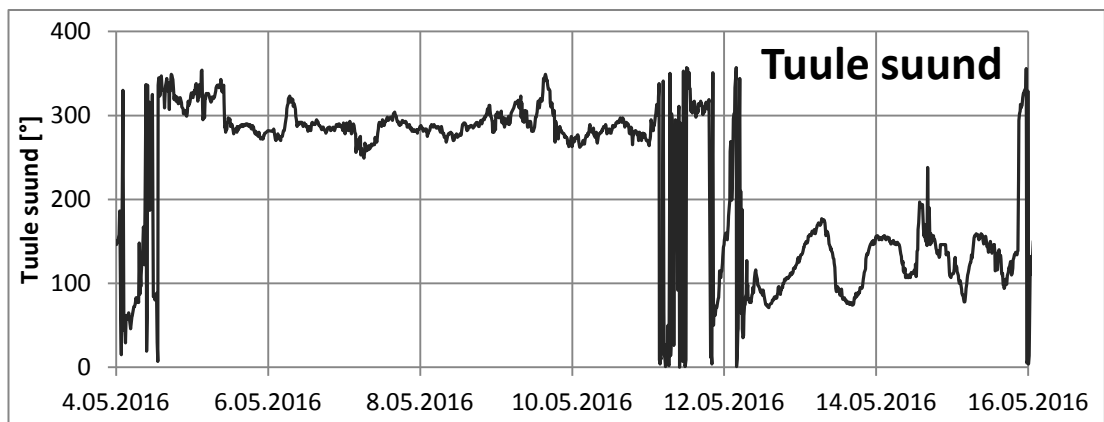
Väiksematel ajamastaapidel on Soome lahe hoovuste ja muude parameetrite muutlikkus mõjutatud tugevalt lokaalsest tuulest (Lips et al., 2016). Laevadelt tehtavate tuule parameetrite mõõtmised näitavad, et Soome lahel valdavad edelatuuled kogu aasta vältel. Soome laht on välja venitatud valdavate tuulte sihis. Ainult märtsist kuni maini võivad domineerida idakaarte tuuled. Tegelikult võib tuulerežiim lahe erinevates osades varieeruda, sest lahe lääneosa on rohkem mõjutatud Läänemere avaosas valdavatest tuultest, kuid idaosa on rohkem maismaaga ümbritsetud. (Soomere & Keevallik, 2003)

Meteoroloogiline informatsioon erinevate parameetrite, nagu tuule, õhutemperatuuri, ja õhurõhu, kohta salvestati Keri saarel asuva TTÜ MSI autonoomses meteojaamas (Lips et al., 2016; TTÜ Meresüsteemide Instituut, 2017). Suurim mõõdetud tuule kiirus oli mõõdistuseksperimenti perioodil 10,8 m/s. Tugevaid tuuli (>10 m/s) esines viiel korral, kuid keskmine tuule kiirus oli 5,9 m/s (vt joonis 4). Valdavalt puhus mõõdistuseksperimenti jooksul mõõdukas (6-10 m/s) tuul. Tugevaid vihmasadusid eksperimenti ajal ei esinenud. 4. ja 11. mail oli tuul keskmiselt nõrk (3-6 m/s).



Joonis 4. Keri saarel registreeritud tuule kiirused perioodil 4.-16. mai 2016.

Nõrga tuule korral oli tuule suund muutlik. 4. mai õhtupoolikul hakkasid puhuma loodetuuled. 5. mai keskpäevast jäi tuul püsivalt puhuma lääneloodest ja läänest. Stabiilne tuul vaibus 11. mail. Peale 12. maid hakkasid puhuma kagutuuled ning eksperimendi viimasel päeval pöördus tuul tagasi läänekaarde (vt joonis 5).



Joonis 5. Registreeritud tuule suunad perioodil 4.-16. mai 2016.

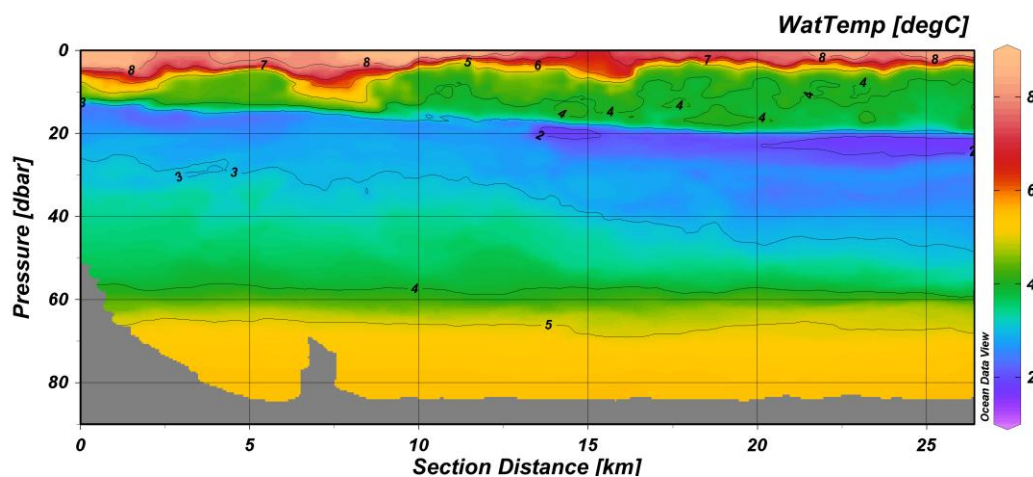
5.2. Taustaandmed

Meres tekkivad hoovused liigutavad suuri veemasse ühest kohast teise. Füüsilised parameetrid, nagu soolsus, temperatuur ja tihedus, on väga olulised veevoolude

tekkimisel. Tihedam vesi vajub põhja lähedale ning kergemast moodustub ülemine veekiht, horisontaalse tiheduse gradiendiga kaasneb horisontaalne rõhugradient, mis omakorda mõjutab vee tsirkulatsiooni. Järgnevalt esitatud joonised näitavad allveeliuguri abil registreeritud temperatuuri, soolsuse ja tiheduse vertikaalseid jaotusi Kolga lahe profileerija ja Soome lahe avaosa vahel. Rõhu väärtusi detsibaarides võib ligikaudu vaadelda sügavusena meetrites.

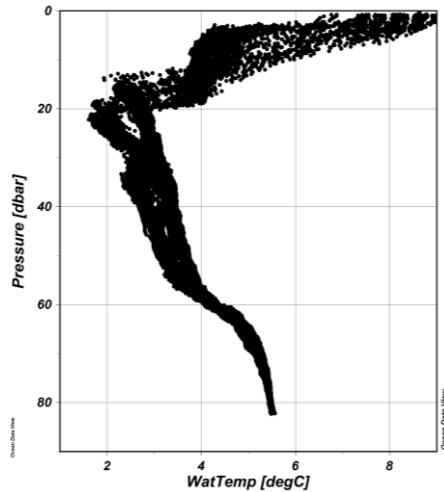
5.2.1. Temperatuur

Graafiline temperatuuri jaotus kujutab kevadist kihistumise tekkimist Soome lahes (vt joonis 6). Selgelt eristub talvisest veest moodustunud külm vahekiht, kus on temperatuur vahemikus 2-3 °C. Tavaliselt on kevade algul pinnakihi vee temperatuurid veel madalamad alumiste kihtide omast, kuid jooniselt 6 on näha, et pinnavee temperatuur on jõudnud tõusta juba põhjalähedase vee omast kõrgemale. Segunenud pinnalähedase veekihi temperatuur on 7-8 °C. Põhja lähedal on temperatuur 5 °C.



Joonis 6. Temperatuuri vertikaalne jaotus Soome lahe ristlõikel liuguri algus- ja lõpp-punkti vahelisel merealal 4.-6. mail 2016. Lõike asukoht kaardil on näidatud joonisel 3.

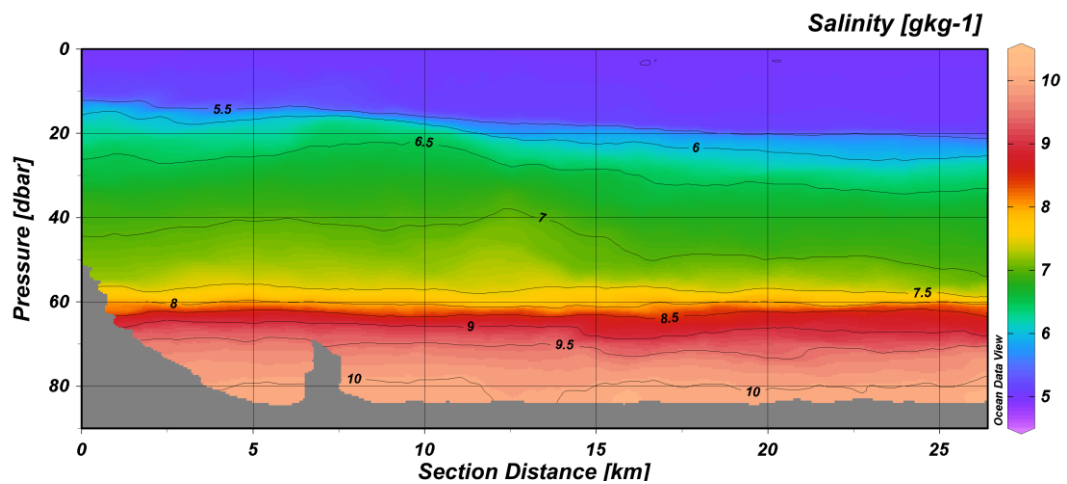
Termokliin kujutab endast veekihti, kus temperatuur sügavuse kasvades väheneb järsult. Kihistuse kujunemisel eristab tekkinud termokliin kahte ülemist veekihti. Väiksema tihedusega soe vesi paikneb külma vahekihi peal. Jooniselt 7 on näha, et mõõdistuseksperimenti ajal on termokliin välja kujunenud veekihis 5-20 meetrit.



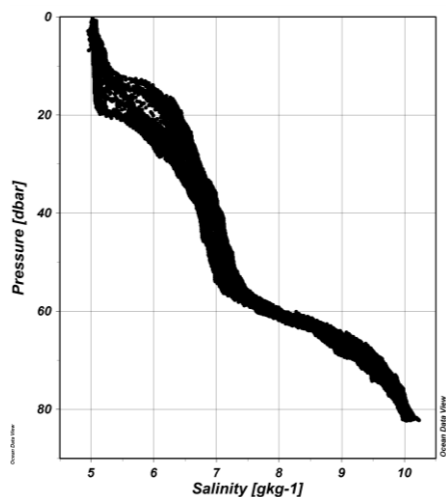
Joonis 7. Temperatuuri vertikaalne jaotus sügavuse kasvades allveeliuguri mõõdistuse põhjal 4.-6. mail 2016.

5.2.2. Soolsus

Soolsust esitatakse tavaliselt grammides kilogrammi merevee kohta (g/kg) ning see näitab lahustunud soolade osakaalu vees. Joonisel 8 on soolsuse vertikaalse jaotuse graafik, millelt on näha, et soolsus suureneb sügavuse kasvades. Pinnakihis on soolsus 5 g/kg, vahekihis 7 g/kg ning põhja lähedal 10 g/kg. Halokliin on kiht, kus soolsus järsult suureneb. Halokliin takistab külma vahekihi ning soojema ja soolasema põhjalähedase kihi segunemist. Jooniselt 9 on näha, et halokliin on välja kujunenud 60 meetri sügavusel.



Joonis 8. Soolsuse vertikaalne jaotus Soome lahe ristlõikel liuguri algus- ja lõpp-punkti vahelisel merealal 4.-6. mail 2016.

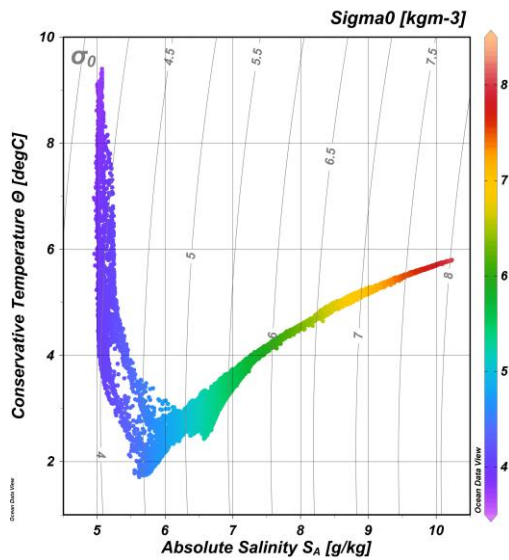


Joonis 9. Soolsuse vertikaalne jaotus sügavuse kasvades allveeliuguri mõõdistuse põhjal 4.-6. mail 2016.

5.2.3. Tihedus

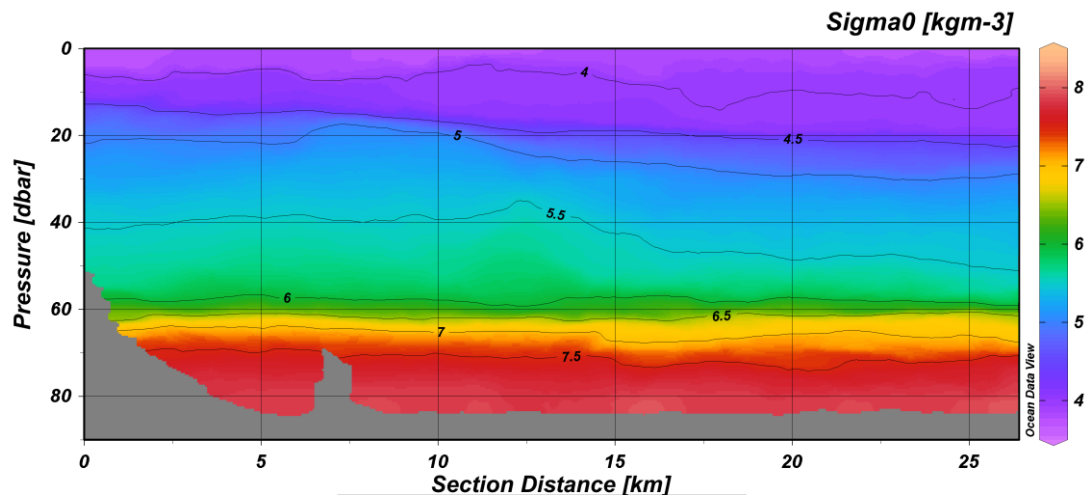
Vee tihedus on olulisel määral mõjutatud temperatuurist ja soolsusest (vt joonis 10). Tihedus on vee mass ruumalaühiku kohta. Magevesi on kõige tihedam +4 °C juures. Soome lahes saavutab vesi soolsuse tõttu maksimaalse tiheduse 2,5 °C juures, mis

tähendab, kui vee temperatuur langeb alla või tõuseb üle selle, muutub tihedus väiksemaks. Kevadel, kui meri hakkab soojenema, põhjustab pinnakihi temperatuuri tõus 2,5 °C juurde vertikaalse konveksiooni. Kui pinnakihi temperatuur aga ületab 2,5 °C, siis konveksioon peatub ja moodustub termokliin.



Joonis 10. Temperatuuri-soolsuse diagramm allveeliuguri mõõdistuse põhjal 4.-6. mail 2016. Diagrammil on toodud ka tiheduse anomaalia (sigma0) isojooned.

Jooniselt 11 on näha, et pinnakihis on tiheduse anomaalia (sigma0) <4,0 kg/m³, vahekihis 4,5-5,0 kg/m³ ning põhja lähedal >7,5 kg/m³.

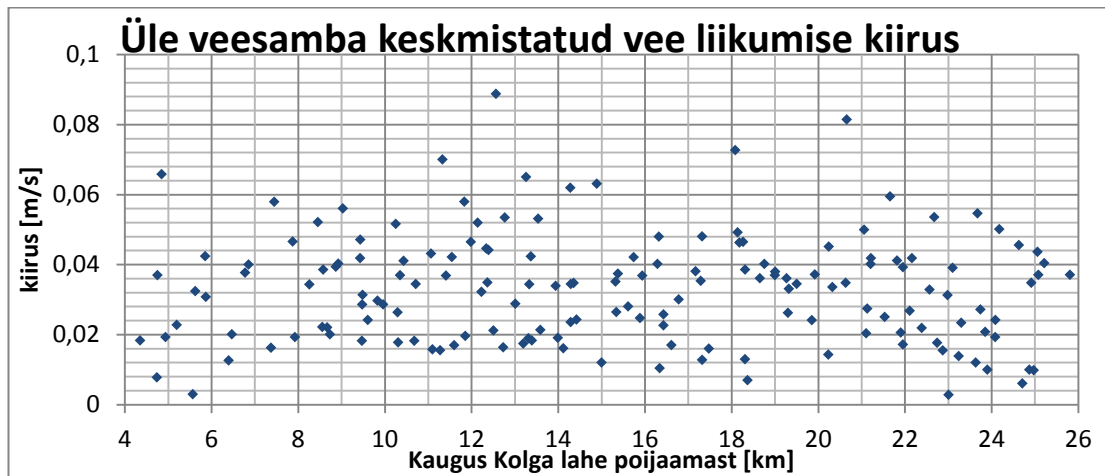


Joonis 11. Tiheduse anomaalia (σ_0) vertikaalne jaotus Soome lahe ristlõikel liuguri algus- ja lõpp-punkti vahelisel merealal 4.-6. mail 2016.

5.3. Vee liikumise iseloomustus

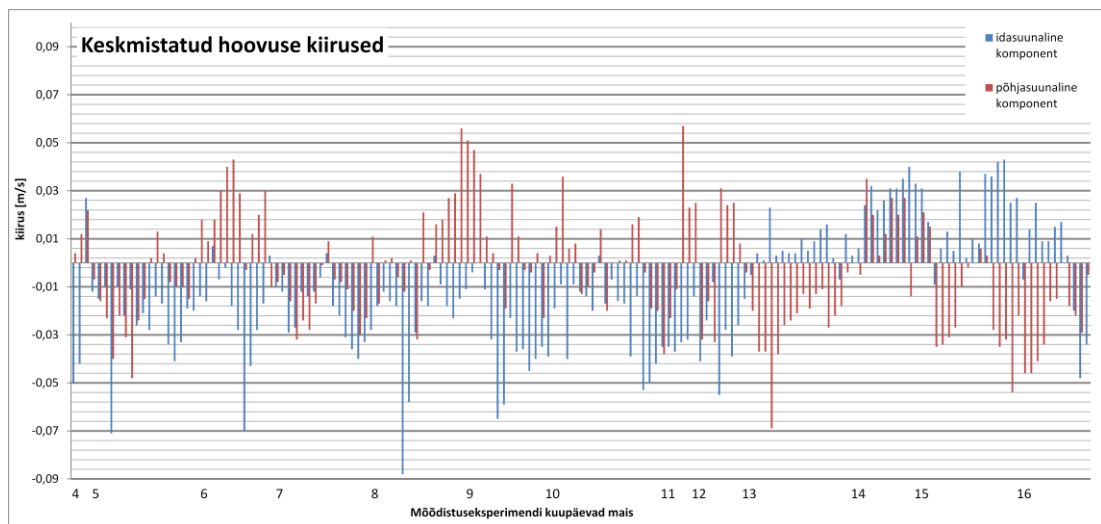
5.3.1. Üle veesamba keskmistatud kiirus

Liuguri poolt arvatud üle veesamba keskmistatud kiirused on suhteliselt üldistatud. Kiiruste väärtused jäid vahemikku 0,003 m/s ja 0,089 m/s. Keskmise vee liikumise kiirus oli 0,033 m/s ehk 3,3 cm/s (vt joonis 12). Kõige sagedamini jäi üle veesamba keskmistatud vee liikumise kiiruse väärtus 0,015 m/s ja 0,040 m/s vahele. See langeb kokku välja toodud faktiga, et mööda Eesti rannikut kulgevas sissevoolus lahte, jääb üle veesamba keskmistatud kiirus 1-4 cm/s vahele (Soomere et al., 2008). Üle veesamba keskmistatud kiirus peabki varieeruma nulli ümber, kuna vee liikumiskiirused ja -suunad eri sügavustel vertikaalselt kihistunud merealal ligikaudu tasakaalustavad üksteist.



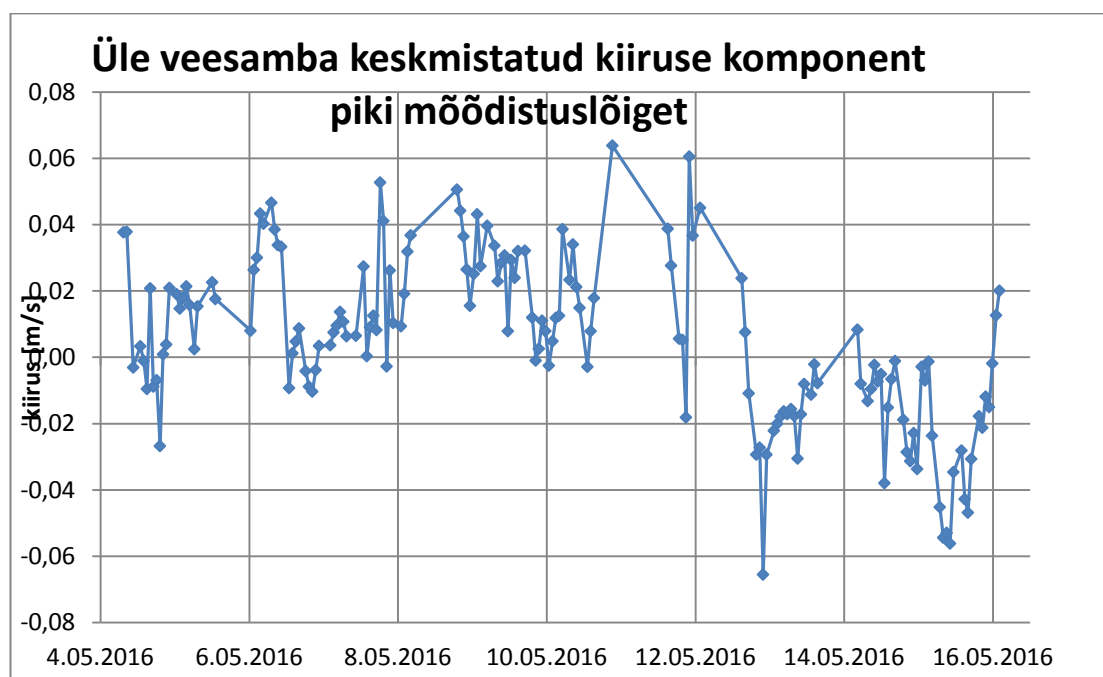
Joonis 12. Perioodil 4.-16.mai 2016 esinenud liuguri poolt hinnatud üle veesamba keskmistatud vee liikumise kiiruse väärtused mõõdistuseksperimendi lõigul.

Joonisel 13 on välja toodud esinenud ida- ja põhjasuunalised kiiruse komponendid ning graafikul väljendub hästi tuule suuna muutuse mõju kiiruse komponentidele. Mõlemad, nii ida- kui ka põhjasuunalise kiiruse komponendid muutuvad peale 12. maid vastupidiseks, kui mõõdistuseksperimendi esimesel poolel domineerinud läänetuuled asenduvad idakaarte omadega.



Joonis 13. Liuguri poolt hinnatud üle veesamba keskmistatud hoovuse ida- ja põhjasuunalised kiiruse komponendid eksperimendi jooksul.

Joonisel 14 on esitatud liuguri poolt hinnatud üle veesamba keskmistatud kiiruse ida- ja põhjasuunalise komponendi põhjal leitud kiiruse komponent, mis on piki mõõdistuslõiget ja positiivseks suunaks on võetud kagu suund. Kuni 12. maini esinevad kiiruse väärtused on enamasti positiivsed, mis tähendab, et läänetuulte puhul oli hoovuse suund ranniku poole. Peale 12. maid esinevad negatiivsed piki lõiget kiiruse väärtused, millest võib järeldada, et tuule pöördumisel kagusse, muutus hoovuse suund rannikust eemale.

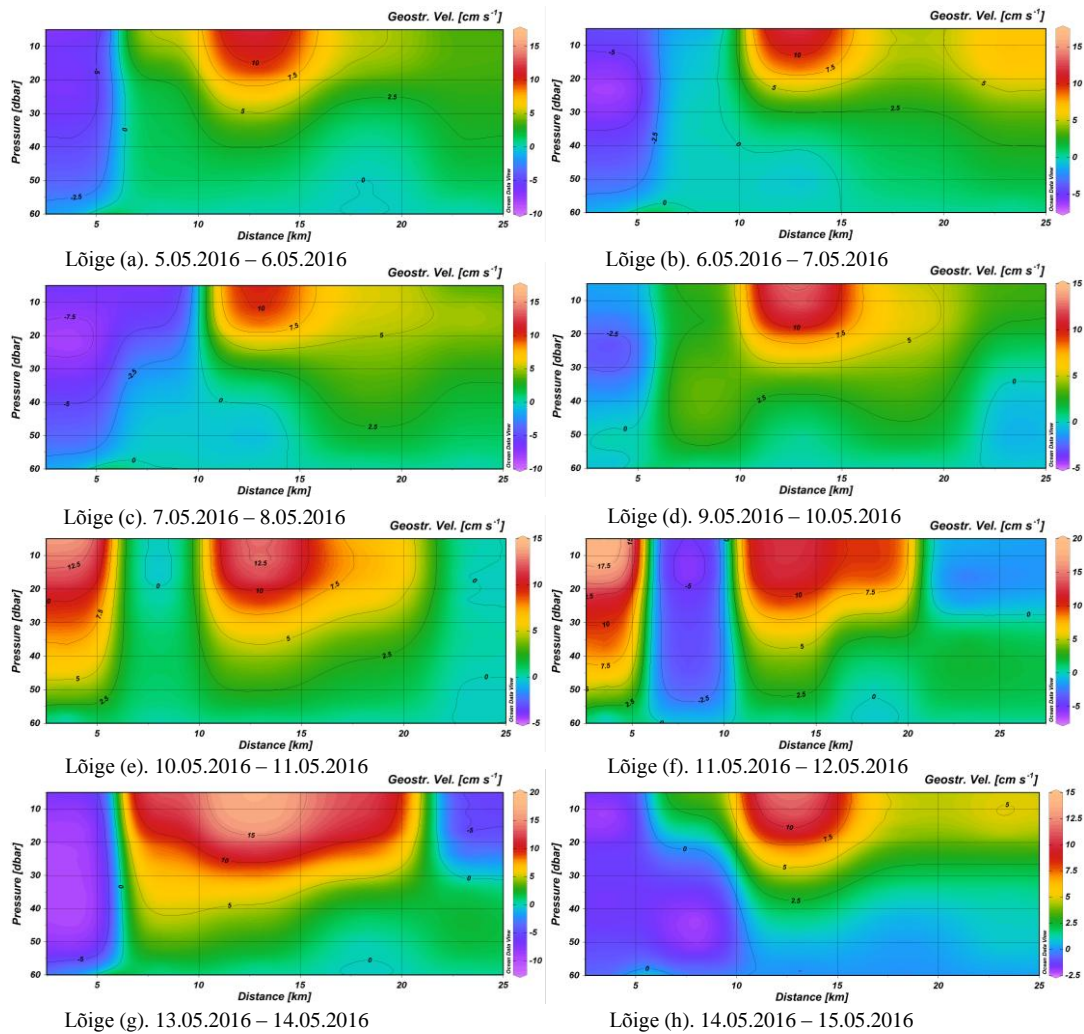


Joonis 14. Liuguri poolt hinnatud üle veesamba keskmistatud kiiruse ida- ja põhjasuunalise komponendi põhjal leitud kiiruse komponent, mis on piki mõõdistuslõiget.

5.3.2. Geostroofilised kiirused

Antud töös leitud geostroofilise kiiruse nullnivooks on võetud 60 meetrit, mis tähendab, et kõikide lõigete jaoks on eeldatud, et geostroofiline kiirus sügavusel 60 meetrit puudub. Nullnivoo valik on põhjendatud tiheduse vertikaalse jaotusega, kust on näha, et 60 meetri sügavusel on tiheduse isojooned ligikaudu horisontaalsed (vt joonis 11). Joonisel 15 kujutatud lõiked on leitud seadme poolt iga läbitud terve

mõõdistuseksperimenti lõigu kohta. Geostroofiliste kiiruste arvutamiseks on valitud 26 kilomeetrise lõigu kohta vertikaalset profiili umbes viie kilomeetrise vahedega. Kõik lõiked on interpoleeritud ühesuguste parameetritega.



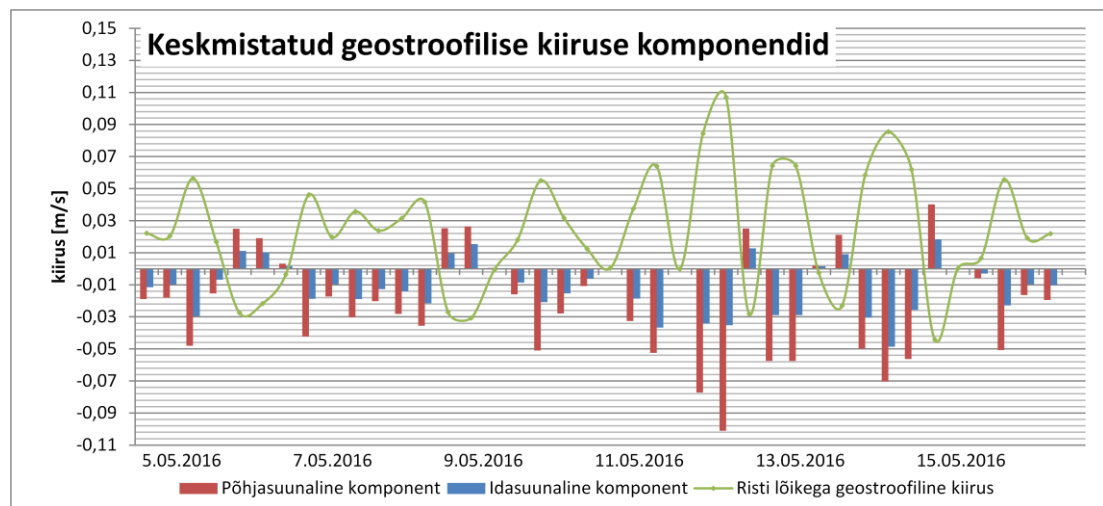
Joonis 15. Allveeliuguri poolt leitud geostroofiliste kiiruse vertikaalsed lõiked Soome lahe ristlõikel liuguri algus- ja lõpp-punkti vahelisel merealal 4.-16. mail 2016. Positiivne kiiruse väärtus vastab edelasse suunatud hoovusele.

Kõige suurem geostroofiline kiirus oli lõike (f) voolu südamikus, kus pinna lähedal on kiirus 19,6 cm/s. Ka lõikel (g) ulatus pinnalähedal kiirus üle 19 cm/s. Enamasti

jääb geostroofilise voolu keskme kiirus 10 cm/s juurde. Alates 50 meetri sügavusest jäävad geostroofilised voolud nõrgemaks ning ületavad harva $\pm 2,5$ cm/s.

Allveeliuguri trajektor kulges kagust loodesse, st geostroofilise voolu suunda oli võimalik hinnata kirde-edela sihis ehk risti lõikega. Keskmiselt oli geostroofilise voolu suund edelasse. Joonisel 15 lõiked (a), (b) ja (c) on mõõdetud läänekaare tuulte domineerimise ajal. Alates 9. maist hakkas edelasuunalise geostroofilise voolu kiirus tõusma. Kiirus voolu keskmis tõusis järk-järgult peaaegu 20 m/s juurde. Seega tuule suuna muutus loodest kagusse tõi kaasa geostroofilise voolu intensiivistumise.

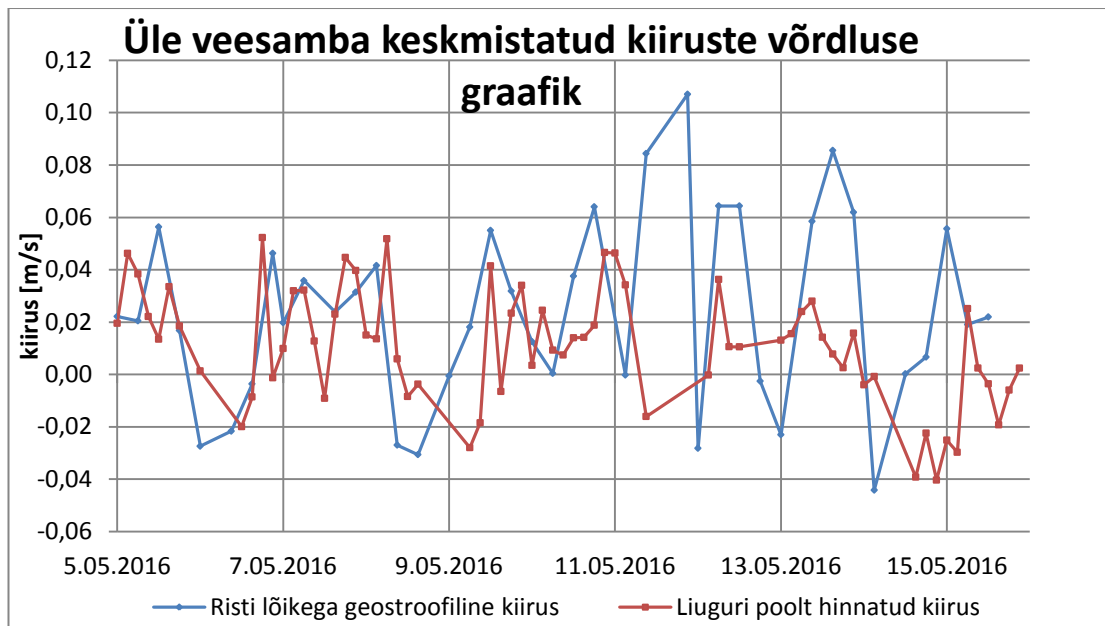
Joonisel 16, kus on toodud üle veesamba keskmistatud geostroofilised kiirused, on näha, et risti lõikega geostroofiliste kiiruste väärtus on alates 11. maist kõrgem kui eelneval kuuel päeval. Keskmistatud geostroofilise kiiruse suurim väärtus joonisel 16 on 12. mail, mis langeb kokku joonisel 15 lõikel (f) esineva geostroofilise kiiruse maksimumiga.



Joonis 16. Üle veesamba keskmistatud risti lõikega geostroofilise kiirus ning põhja- ja idasuunalised komponendid.

Joonisel 17 on välja toodud üle veesamba keskmistatud lõikega risti suunatud geostroofiliste kiiruste ja üle veesamba keskmistatud allveeliuguri poolt hinnatud

kiiruste kokkulangevus. Antud graafikul on üle veesamba keskmistatud liuguri poolt hinnatud kiiruste puhul tegemist kiiruse ida- ja põhjasuunalise komponendi põhjal leitud kiiruse komponendiga, mis on risti mõõdistuslõikega ja positiivseks suunaks on võetud edela suund. Kiiruste puhul on näha sarnast tendentsi ning mõõdistuseksperimenti esimesel poolel on kiiruste kokkulangevus väga hea. Samas saab geostroofika lähenduses vaid geostroofika komponenti sisaldava kiiruse, kuna eeldusena võetud nullnivoole pole tegelik kiirus teada, aga üle veesamba keskmist kiirust võivad mõjutada väga erinevad faktorid ning ka vead, mis tähendab, et kokkulangevuse puudumine on samuti seletatav. Erinevusi on võimalik osaliselt korrigeerida näiteks nullnivoole nihutamisega üles- või allapoole.



Joonis 17. Üle veesamba keskmistatud allveeliuguri poolt hinnatud kiiruste ja geostroofiliste kiiruste võrdluse graafik.

KOKKUVÕTE

Eestis on allveeliuguriga teostatud mõõtmised veel üsna uudsed. Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide Instituut kasutab uurimustööde teostamiseks *Teledyne Webb Research*'i allveeliugurit Slocum G2. Seadmega on võimalik kirjeldada merekeskkonna parameetreid analüüsides anduritega saadud andmeid. Allveeliuguriga saab teha kindla aja ja pikkusega mõõtmisi ning andmeid saadakse kõrge lahutuse ja ulatusega, mis võimaldab näiteks jälgida püknokliinide kujunemist ja nende asukoha muutusi ajas. Lisaks saab jälgida temperatuuri sesoonseid muutusi ja soolsuse varieeruvust meres horisontaal- ja vertikaalsihis. Läänemeres on oluline jälgida stratifikatsiooni tekkimist kevadel.

Liuguri andmete abil on võimalik hinnata hoovuste kiirusi. Kiirusi saab määrata, kas navigatsioonilise algoritmi põhjal või vaadeldes dünaamiliste kõrguste erinevusi. Navigatsioonilise algoritmi põhjal on võimalik leida üle veesamba keskmistatud kiirus. Hoovuse kiirus leitakse koordinaatide erinevusest, mis tekib liuguri enda arvutatud pinnale tõusmise punkti koordinaatide ja tegelike GPS-i kinnitatud koordinaatide vahel. Liugur edastab üle veesamba keskmistatud kiiruse jaoks ida- ja põhjasuunalised komponendid, millest on võimalik trigonomeetriliste funktsioonide abil tuletada kiiruse komponendid valitud suundades, näiteks risti mõõdistuslõikega. Üle veesamba keskmistatud kiirused jäid enamasti väärtusvahemikku 1-4 cm/s. Kiiruse graafilises esituses paistis selgelt välja tuule suuna muutuse mõju kiiruse väärtustele. Mõõdistusekseprimendi esimesel poolel puhusid valdavalt läänetuuled ja hoovuse suund oli ranniku poole, kuid tuule pöördumisel kagusse, liikus hoovus rannikust eemale.

Dünaamiliste kõrguste erinevusest on võimalik leida hoovuse geostroofilisi kiirusi ning selle arvutamiseks on tarvis vaadelda tiheduse jaotusi, mis leitakse mõõdetud temperatuuri ja soolsuse profiilide abil. Antud mõõdistuseksperimentis oli liuguri andmete põhjal võimalik leida lõikega risti olevat ehk kirde-edela suunalist

geostroofilist kiirust. Hoovuse geostroofilistes kiirustes põhjustas tuule suuna muutus piki Soome lahe rannikut edelasse suunatud geostroofilise voolu intensiivistumise. Geostroofilise kiiruse võrdlemisel üle veesamba keskmistatud kiiruse ristkomponendiga oli kokkulangevus hea eksperimendi esimesel poolel, kui puhusid mõõdukad ja püsivad läänetuuled.

Varem ei ole Eestis allveeliugurit hoovuse kiiruste hindamiseks kasutatud, kuid selline lähenemine võimaldab liuguriga saadud andmete kasutusvõimalust potentsiaalselt edasi arendada. Hoovuse kiirusi on võimalik hinnata andmetest, mida seade mõõdab kogu aeg, mis tähendab, et liuguriga teostatud eksperimendi peamine eesmärk võib olla seotud hoopis mõne muu meres toimuva protsessiga. Käesolevas töös on geostroofiliste kiiruste hindamiseks kasutatud tarkvarapaketti ODV, kuid vastava programmi koostamisel näiteks MATLAB-is saaks arvutada geostroofilisi kiirusi, kasutades ära kõigi registreeritud profiilide andmeid. Tööd on võimalik edasi arendada, lisades kiiruste võrdusesse ka ADCP poolt mõõdetud andmed, mis saadi merre paigutatud ADCP-ga allveeliuguri mõõdistuseksperimendi ajal samas piirkonnas (kahjuks on ADCP hetkel veel meres ja andmeid ei ole olnud võimalik kätte saada). Kuna üle veesamba keskmistatud kiiruse väärtused on suhteliselt üldistatud, siis ADCP andmete põhjal on võimalik saada aimu vee liikumisest veesamba sees, kuid ainult ühes punktis. Seega saaksime kõige täielikumad tulemused, kui kasutaksime ära erinevate mõõteriistade plussid ja kombineeriksime analüüsi käigus nendega samaaegselt registreeritud andmeid.

TÄNUAVALDUSED

Bakalaureusetöö autor tahab tänada oma juhendajat professor Urmas Lipsu juhendamise ja nõuannete eest. Samuti tänan TTÜ Meresüsteemide Instituuti abi ning andmete edastamise eest.

VIIDATUD KIRJANDUS

- Couto, N., Schofield, O., & Kohut, J. (2016). Comparison between glider-derived geostrophic velocities and shipboard ADCP measurements, 1–5. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2016.7761286>
- Elken, J. (2017). Ookeani dünaamika, hoovused. [õppematerjal, Tallinna Tehnikaülikool, õppeaine merefüüsika ja hüdroloogia]
- Fan, S., & Woolsey, C. A. (2014). Dynamics of underwater gliders in currents. *Ocean Engineering*, 84, 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.03.024>
- Hussain, N. A. A., Arshad, M. R., & Mohd-Mokhtar, R. (2011). Underwater glider modelling and analysis for net buoyancy, depth and pitch angle control. *Ocean Engineering*, 38(16), 1782–1791. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.09.001>
- Jones, C., Allsup, B., & Decollibus, C. (2014). Slocum glider: Expanding our understanding of the oceans. In *Oceans - St. John's, 2014*. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.2014.7003260>
- Kerfoot, J. (2011). RU-COOL Slocum Glider Datasets. Retrieved March 11, 2017, from <https://marine.rutgers.edu/~kerfoot/slocum/data/readme/>
- Kerfoot, J. (2014). Slocum Glider Data File Primer. Retrieved March 11, 2017, from <https://github.com/kerfoot/spt/wiki/Slocum-Glider-Data-File-Primer>
- Lacki, P., & Derlatka, A. (2017). Strength evaluation of beam made of the aluminium 6061-T6 and titanium grade 5 alloys sheets joined by RFSSW and RSW. *Composite Structures*, 159, 491–497. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.10.002>
- Liblik, T., Karstensen, J., Testor, P., Alenius, P., Hayes, D., Ruiz, S., ... Mauri, E. (2016). Potential for an underwater glider component as part of the Global Ocean Observing System. *Methods in Oceanography*, 17, 50–82. <https://doi.org/10.1016/j.mio.2016.05.001>
- Liblik, T., & Lips, U. (2012). Variability of synoptic-scale quasi-stationary thermohaline stratification patterns in the Gulf of Finland in summer 2009. *Ocean Science*, 8(4), 603–614. <https://doi.org/10.5194/os-8-603-2012>
- Lips, U., Liblik, T., Lips, I., & Rünk, N. (2016). Combining glider surveys and

vertical profilers for process studies in the stratified estuaries (Gulf of Finland, Baltic Sea). In *7th EGO Conference*. Southampton.

Lips, U., & Lips, I. (2013). *Marine Research/Mereteadus*. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool.

Merckelbach, L. (2016). Depth-averaged instantaneous currents in a tidally dominated shelf sea from glider observations. *Biogeosciences Discussions*, *13*, 6637–6649. <https://doi.org/10.5194/bg-2016-118>

Rudnick, D. L. (2016). Ocean Research Enabled by Underwater Gliders. *Annual Review of Marine Science*, *8*, 519–541. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-122414-033913>

Rudnick, D. L., Davis, R. E., Eriksen, C. C., Fratantoni, D. M., & Perry, M. J. (2004). Underwater Gliders for Ocean Research. *Marine Technology Society Journal*, *38*(2), 73–84. <https://doi.org/10.4031/002533204787522703>

Schlitzer, R. (2016). *Ocean Data View User's Guide*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Schofield, O., Kohut, J., Aragon, D., Creed, L., Graver, J., Haldeman, C., ... Glenn, S. (2007). Slocum Gliders: Robust and Ready. *Journal of Field Robotics*, *24*(6), 473–485. <https://doi.org/10.1002/rob>

Soomere, T. (2007). Vesi meres kerkib ja vajub. Retrieved April 15, 2017, from http://www.eestiloodus.ee/artikkel2004_2002.html

Soomere, T., & Keevallik, S. (2003). Directional and extreme wind properties in the Gulf of Finland, 73–90.

Soomere, T., Myrberg, K., Leppäranta, M., & Nekrasov, A. (2008). The progress in knowledge of physical oceanography of the Gulf of Finland: A review for 1997–2007. *Oceanologia*, *50*(3), 287–362.

Teledyne Webb Research. (2012). *Slocum G2 Glider Operators Manual*.

The Euro Argo ERIC. (2016). Profiling Floats. Retrieved April 1, 2017, from <http://www.euro-argo.eu/Activities/Floats-Developments-Deployments/Profiling-Floats>

TTÜ Meresüsteemide Instituut. (2017). Aparatuur. Retrieved April 22, 2017, from <https://www.ttu.ee/instituut/meresusteemide-instituut/laborid-ja-teenused-7/aparaatuur/>

Väli, G., Zhurbas, V., Laanemets, J., & Elken, J. (2011). Simulation of nutrient transport from different depths during an upwelling event in the Gulf of Finland. *Oceanologia*, 53(1-TI), 431–448. <https://doi.org/10.5697/oc.53-1-TI.431>

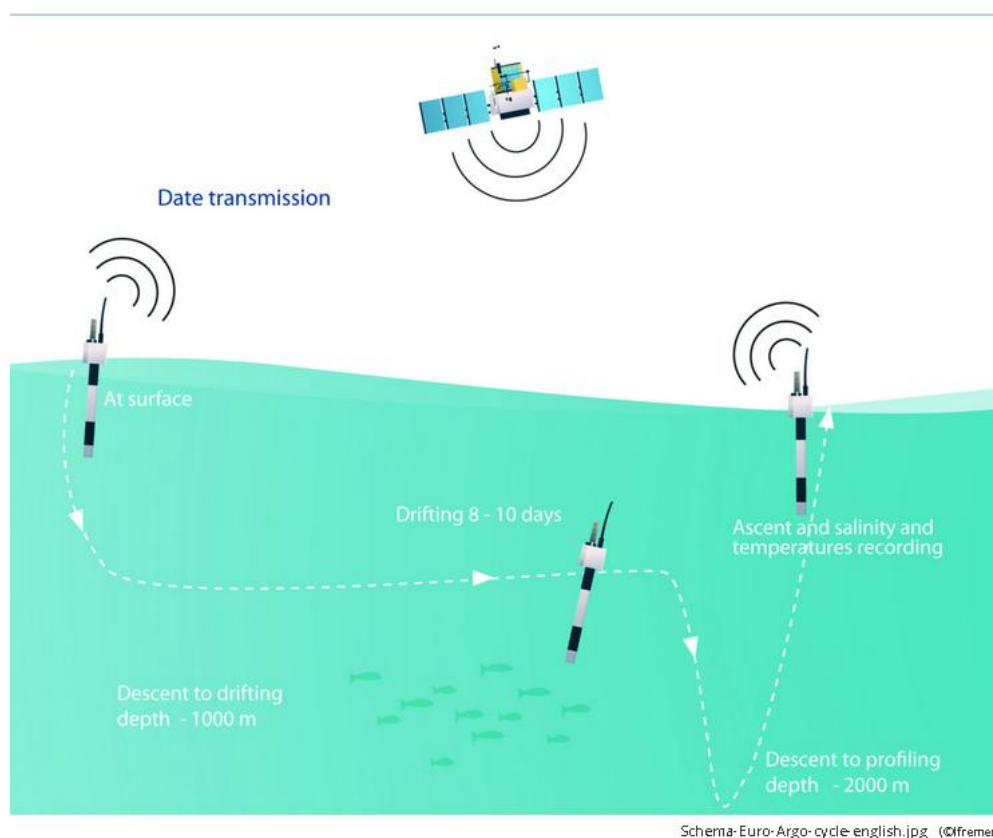
Yopak, R. (2007). Comparing Glider Observed Velocities and Geostrophic Currents, 1–19. Retrieved March 11, 2017, from http://cioss.coas.oregonstate.edu/CIOSS/Documents/Regina_Yopak.pdf

LISAD

Lisa 1

Argo triivpoi mõõtmistsükkel

Triivpoi üks tsükkel, mis jaguneb omakorda kaheks osaks, kestab tavaliselt kümme päeva. Tsükli alguses sukeldub seade 1000 meetri sügavusele ja triivib seal mõõtmisi kuni tsükli teise osani, kui seade on programmeeritud sukelduma 2000 meetri sügavusele. Seejärel tõuseb seade pinnale, registreerides parameetrite vertikaalsed profiilid, edastab läbi satelliidi kogutud andmed ning alustab uut tsüklit. (The Euro Argo ERIC, 2016)



Lisa 2

TTÜ MSI poolt välja arendatud järelveetav mõõtesead.



Photos: MSI archive

(TTÜ Meresüsteemide Instituut, 2017)

Lisa 3

CTD andmed ODV programmile sobivas formaadis

Sisend NaN andmestikus tähendab, et antud tsüklis selle anduri andmeid ei uuendatud.

C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
LatGPS	LonGPS	Year	Month	Day	Hour	Minute	Second	Pressure[dbar]	WatTemp[degC]	Salinity[psu]	Salinity[gkg-1]	Sigma0[kgm
59,71694	25,03474	2016	5	4	21	31	20,3	0,7	NaN	NaN	NaN	NaN
59,71691	25,0347	2016	5	4	21	31	21,3	0,8	8,56	4,92	5,02	NaN
59,71689	25,03467	2016	5	4	21	31	22,3	0,9	NaN	NaN	NaN	NaN
59,71686	25,03463	2016	5	4	21	31	23,3	1	8,55	4,92	5,02	NaN
59,71685	25,03462	2016	5	4	21	31	23,5	1	NaN	NaN	NaN	NaN
59,71683	25,03459	2016	5	4	21	31	24,3	1,2	NaN	NaN	NaN	NaN
59,71681	25,03455	2016	5	4	21	31	25,3	1,3	8,51	4,92	5,01	NaN
59,71678	25,03452	2016	5	4	21	31	26,3	1,4	NaN	NaN	NaN	NaN
59,71675	25,03448	2016	5	4	21	31	27,4	1,6	8,38	4,91	5,01	NaN
59,71674	25,03445	2016	5	4	21	31	28,1	1,7	NaN	NaN	NaN	NaN
59,71673	25,03444	2016	5	4	21	31	28,4	1,8	NaN	NaN	NaN	NaN
59,7167	25,0344	2016	5	4	21	31	29,4	1,9	7,78	4,91	5,01	NaN
59,71667	25,03437	2016	5	4	21	31	30,4	2	NaN	NaN	NaN	NaN
59,71665	25,03433	2016	5	4	21	31	31,4	2,1	7,39	4,92	5,01	NaN
59,71662	25,03429	2016	5	4	21	31	32,4	2,3	NaN	NaN	NaN	NaN
59,71661	25,03428	2016	5	4	21	31	32,6	2,3	NaN	NaN	NaN	NaN
59,71659	25,03425	2016	5	4	21	31	33,4	2,4	7,06	4,91	5	NaN
59,71657	25,03422	2016	5	4	21	31	34,4	2,5	NaN	NaN	NaN	NaN
59,71654	25,03418	2016	5	4	21	31	35,4	2,7	6,51	4,92	5,02	NaN
59,71651	25,03414	2016	5	4	21	31	36,4	2,9	NaN	NaN	NaN	NaN
59,7165	25,03411	2016	5	4	21	31	37,1	3	NaN	NaN	NaN	NaN
59,71649	25,0341	2016	5	4	21	31	37,4	3,1	6,02	4,93	5,02	NaN
59,71646	25,03407	2016	5	4	21	31	38,4	3,3	NaN	NaN	NaN	NaN
59,71643	25,03403	2016	5	4	21	31	39,4	3,4	5,59	4,93	5,02	NaN

Lisa 4

Näide allveeliuguri trajektooriga, mis kujutab endast kolmest sukeldumisest koosnevat mõõtetükkide, peale mida seade pinnale tõuseb, et andmeid edastada ja oma asukohta kontrollida.

