

# Meregeoidi mudelite valideerimine GNSS- ja aerolaserskaneerimise profiilidega

Sander Varbla – Tallinna Tehnikaülikool, sander.varbla@taltech.ee

## Sissejuhatus

Geoidiks nimetatakse ekvipotentsiaalpinna, mis ühtib ligikaudu Maa gravitatsiooni ja pöörlemise poolt vormitud ookeanide häirimata veepinnaga ehk keskmise meretasemega (MSL). Selleks, et säärase gravitatsioonivälja mudeldatud potentsiaalpinna täpsust kontrollida, on vaja sõltumatuid andmeid. Maismaal kasutatakse selleks reeglina GNSS-nivelleerimise kontrollpunkte, mida aga merel ei ole võimalik üles seada. Selle asemel võib meregeoidi mudelite hindamiseks kasutada laeval mõõdetud GNSS- või aerolaserskaneerimise (ALS) kõrgusprofiile. Niisiis keskendubki käesolev töö suuresti meregeoidi mudelite hindamise printsiipide väljaselgitamisele. Näiteks on äärmiselt oluline mõõdistusandmetest lainetuse mõju elimineerida, mille tarbeks töötati välja vastavad filtreerimismetoodikad. Selleks, et võtta arvesse merepinna dünaamikast tulenevad muutused, rakendati regionaalset hüdrodünaamika mudelit (HDM) HBM-EST (Lagema 2012) ning kohalike veemõõdujaamade (TG) andmeid.

Antud artikli aluseks on autori 2019. aastal Tallinna Tehnikaülikoolis (TalTech) kaitstud magistritöö „Assessment of marine geoid models by shipborne GNSS and

airborne laser scanning profiles“ (Varbla 2019), mida juhendas prof Artu Ellmann. Töö eesmärk oli välja töötada ning rakendada sobivad meetodikad meregeoidi mudelite valideerimiseks.

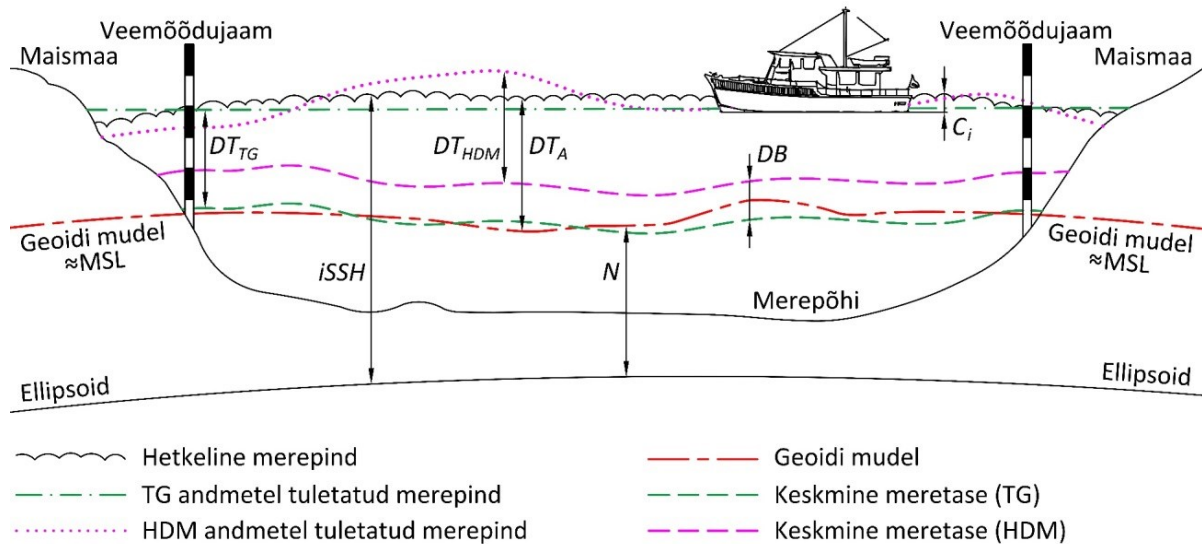
## Teoreetilised alused

Meregeoidi mudelite valideerimise aluseks on teadmine, et merealadel ühtib MSL ligikaudu geoidiga ( $N$ ):

$$MSL(\varphi, \lambda) \approx N(\varphi, \lambda). \quad (1)$$

Tuleb aga tähele panna, et mõõdistustööde tulemusena (nii laeval mõõdetava GNSS-i kui ka ALS-i korral) saadakse andmed hetkelise merepinna kohta ( $iSSH$ ) (referentselipsoidi, nt GRS-80, suhtes), mida mõjutavad tuule suund ning kiirus, hoovused jms. Selleks, et need mõõdistusandmed MSL-iga siduda, on vaja rakendada (tegeliku) dünaamilise topograafia (DT) parandit ( $DT_A$ ), mis esialgu on tundmatu. Kui tegemist on laeval mõõdetud GNSS-profiilidega, siis tuleb lisaks kasutada täiendavaid parandeid ( $C_i$ ), nagu näiteks kütusekulust või laeva süvise muutusest tingitud parand (vt joonis 1):

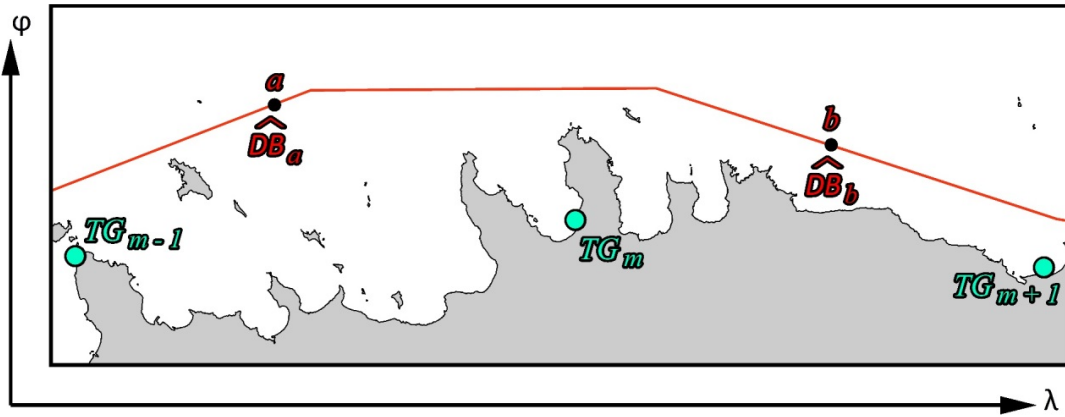
$$MSL(\varphi, \lambda) = iSSH(\varphi_i, \lambda_i) - DT_A(\varphi_i, \lambda_i) - C_i. \quad (2)$$



Joonis 1. Keskmise meretaseme tuletamine ning selles osalevad referentspinnad. Kasutatud sümbolid on selgitatud tekstis.

DT parandit on võimalik hinnata näiteks lähedalasuvate TG jaamade lugemitest – vt nt Liibus *et al.* (2013). Kuna TG jaamad asuvad tüüpiliselt maismaa vahetus läheduses, ei pruugi neist tuletatud info iseloomustada avamerel toimuvat. Seetõttu oleks mõistlikuks alternatiiviks kasutada sobilikku HDM-i, nagu näiteks antud töös kasutatav HBM-EST. Tuleb aga meeles pidada, et HDM-e mõjutab dünaamiline hälbimus (DB) kõrguslikest referentsüsteemidest – vt nt

Allik (2014). Selle madalsageduslik element varieerub sõltuvalt asukohast ning muutub aeglaselt, kuid pidevalt ajas (Lagema *et al.* 2011), mistõttu ei ole tegemist konstantse väärtusega, mida saaks lihtsa 1D-nihkega elimineerida. Küll aga saab DB väärtusi tuvastada ning elimineerida, kasutades selleks TG jaamade lugemeid, mistõttu oleks soovituslik kasutada modelleeritud merepinna ning TG andmeid koos (joonis 2).



**Joonis 2.** HDM-i parandite tuletamine.  $TG_{m-1}$ ,  $TG_m$  ja  $TG_{m+1}$  tähistavad TG jaamasid.  $a$  ja  $b$  on üksikud profiilipunktid koordinaatidega  $\varphi_i$ ,  $\lambda_i$ ,  $h_i$ .  $\widehat{DB}_a$  ja  $\widehat{DB}_b$  on hinnangulised parandid HDM-ile vastavalt asukohtades  $a$  ja  $b$ .

DB elimineerimiseks töötati välja kaks meetodit, millest esimene on „kaalutud“ meetod. Selleks tuleb esmalt leida DB väärtused HDM-i kõrguste ( $DT_{HDM}$ ) ning TG lugemite ( $DT_{TG}$ ) vahel TG jaamade asukohtades (joonised 1 ja 2):

$$DB(\varphi_j, \lambda_j)_i = DT_{HDM}(\varphi_j, \lambda_j)_i - DT_{TG}(\varphi_j, \lambda_j)_i, \quad (3)$$

kus  $j = 1, \dots, m-1, m, m+1, \dots, n$  tähistab TG jaama ( $n$  on arvutustesse kaasatud TG jaamade koguarv). Alaindeks  $i$  tähistab kindlat ajahetke.

Edasi saab arvutada parandid  $\widehat{DB}$  HDM-ile. Näiteks profiilipunkti  $a$  asukohas on parand:

$$\widehat{DB}_a(\varphi_i, \lambda_i) = \frac{DB(\varphi_1, \lambda_1)_{i+\dots} + 2*DB(\varphi_{m-1}, \lambda_{m-1})_{i+\dots} + 2*DB(\varphi_m, \lambda_m)_{i+\dots} + DB(\varphi_n, \lambda_n)_i}{n+2}, \quad (4)$$

punkti  $b$  asukohas aga:

$$\widehat{DB}_b(\varphi_i, \lambda_i) = \frac{DB(\varphi_1, \lambda_1)_{i+\dots} + 2*DB(\varphi_m, \lambda_m)_{i+\dots} + 2*DB(\varphi_{m+1}, \lambda_{m+1})_{i+\dots} + DB(\varphi_n, \lambda_n)_i}{n+2}. \quad (5)$$

Tasub tähele panna, et DB väärtuste kaalud sõltuvad uuritavast alast (DB väärtused kahes lähimas TG jaama asukohas on kaalutud kahega).

Alternatiivselt saab  $\widehat{DB}$  tuletada funktsioonina kas pikkus- või laiuskraadist. Näiteks profiilipunkti  $a$  asukohas leitakse  $\widehat{DB}$  järgnevalt (joonis 2):

$$X1 = DB(\varphi_{m-1}, \lambda_{m-1})_\chi * (\lambda_m - \lambda_a) + DB(\varphi_m, \lambda_m)_\chi * (\lambda_a - \lambda_{m-1}), \quad (6)$$

$$X2 = DB(\varphi_{m-1}, \lambda_{m-1})_{\chi+1} * (\lambda_m - \lambda_a) + DB(\varphi_m, \lambda_m)_{\chi+1} * (\lambda_a - \lambda_{m-1}), \quad (7)$$

$$\widehat{DB}_a(\varphi_i, \lambda_i) = \frac{X1}{(\lambda_m - \lambda_{m-1})} + \frac{X2 - X1}{(\lambda_m - \lambda_{m-1})} * i, \quad (8)$$

kus alaindeks  $\chi$  tähistab täistundi, mille kohta on reeglina veetaseme andmed olemas. Profiilipunkti  $b$  asukohas leitakse  $\widehat{DB}$  analoogselt. Neist kahest meetodist esimene on universaalsem, sest ei sõltu TG jaamade paiknemisest. Teise meetodi eeliseks on täpsem tulemus, kuid selle kasutus on piiratud, kuna eelduseks on rannajoone (sh TG jaamade) ligikaudne ühtivus kas paralleelide või meridiaanidega (nagu näiteks Eesti põhjarannik).

Nüüd, kus parandid  $\widehat{DB}$  HDM-ile on leitud, saab välja arvutada  $DT$ :

$$DT(\varphi_i, \lambda_i) = DT_{HDM}(\varphi_i, \lambda_i) - \widehat{DB}(\varphi_i, \lambda_i) \approx DT_A(\varphi_i, \lambda_i). \quad (9)$$

Saadud tulemus peaks ligikaudu ühtima tegeliku  $DT$ -ga ( $DT_A$ ).

Võttes lõpuks arvesse valemeid (1), (2) ja (9), saab välja selgitada geoidi mudeli vea:

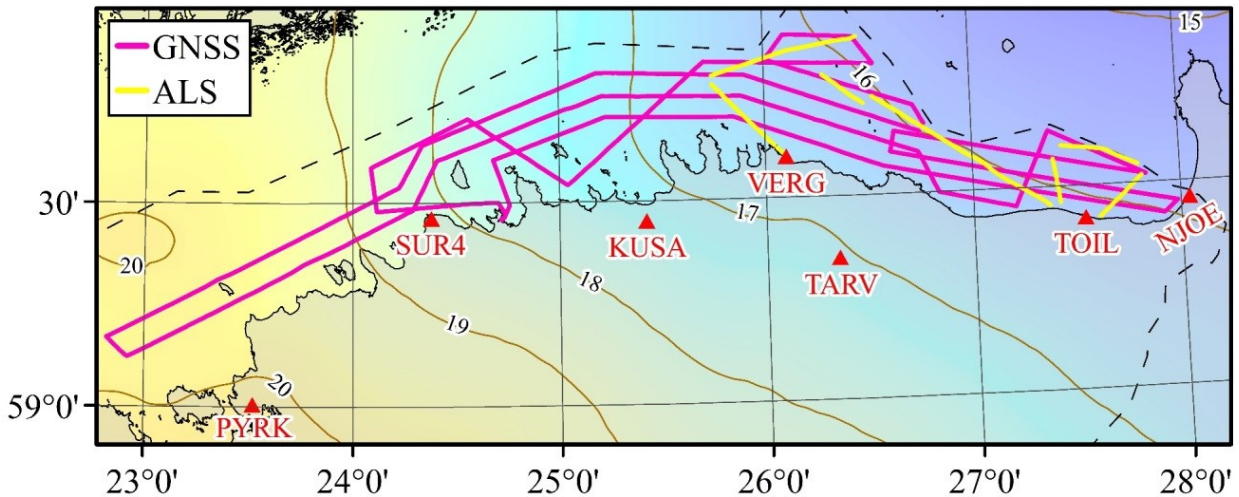
$$N(\varphi, \lambda) - iSSH(\varphi_i, \lambda_i) - DT(\varphi_i, \lambda_i) - C_i = D(\varphi, \lambda), \quad (10)$$

kus  $D$  on testitava mudeli ( $N$ ) hälvimine GNSS- või ALS-kõrgusprofiilist ehk meregeoidi mudeli viga. Siinkohal tuleks aga arvesse võtta, et vead võivad esineda ka teistes liikmetes.

**Kasutatud andmed**

2017. aasta 3. kuni 6. juulini toimusid Soome lahel meregravimeetrilised mõõdistused (joonisel 3 on kujutatud laeva marsruut), mis viidi läbi Veeteede ameti poilaeval Sektori. Kokku läbiti selle aja jooksul 1249 km (674 meremiili). Tööde käigus koguti ka geoidi mudelite valideerimiseks vajalikud GNSS-andmed. Nimelt paigaldati laeva reelingute kül-

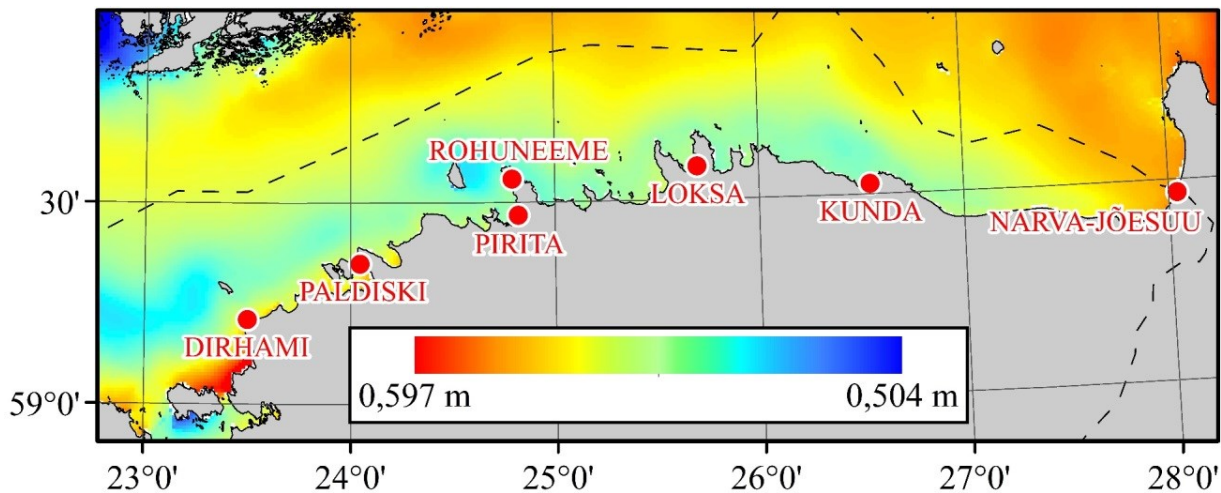
ge kolm GNSS-seadet (kaks neist vööri ja üks kaptenisilla kohale, nii et moodustus kolmnurk), mis seadistati iga 15 sekundi (1/15 Hz) tagant andmeid koguma. Nende andmete abil arvutati hiljem Maa-ameti GNSS-püsijaamade suhtes (joonis 3) kõrgusprofiilid (iga seadme kohta üks profiil). Mõõdistustööde kohta saab täpsemalt lugeda Geodeedist 47 (Varbla et al. 2017a).



**Joonis 3.** Laeva marsruut ning lennutrajektorid. Punaste kolmnurkade ning 4-tähealiste lühenditega on märgitud töös kasutatud GNSS-püsijaamad. Sini-kollase pinna ning pruunide samajoontega on kujutatud EST-GEOID2017 mudel, ühikud meetrites. Must kriipsjoon tähistab Eesti piiri.

Lisaks GNSS-profiilidele on töös kasutatud eelnevalt koordineeritud ALS-punktipilvesid, millest arvutati ALS-kõrgusprofiilid. Andmed pärinevad Maa-ameti poolt korraldatud ALS-i kampaaniast, mis toimus 10. mail 2018. aastal (lennutrajektorid on kujutatud joonisel 3). Mõõdistustöödeks kasutati Maa-ameti uut aerolaserskanerit Riegl VQ-1560i, mille kohta saab samuti juurde lugeda Geodeedist 47 (Grünthal ja Gruno 2017).

Eelnevalt mainitult pärinevad DT andmed HBM-EST HDM-ist (joonis 4), mis on kõigile huvilistele vabalt kättesaadav Tallinna Tehnikaülikooli Meresüsteemide instituudi kodulehelt (<http://emis.msi.ttu.ee/allalaadimine/>). Igat täistundi kirjeldab andmekiht, kust lisaks DT andmetele saab infot ka tuule kiiruse ja suuna, soolsuse, temperatuuri, hoovuste ja jää kohta. HBM-EST HDM on Eesti lähendus mudelist HIROMB-BOOS (HBM). See on olnud pidevas arendustöös alates 2005. aastast – juurde saab lugeda doktori-tööst Lagemaa (2012).



**Joonis 4.** Näide DT andmetest, mis pärinevad HBM-EST HDM-ist 5. juulil 2017 kell 17:00 (kohalik aeg). Punaste ringide ja tekstidega on tähistatud TG jaamad, mille andmeid töös kasutati. Musta kriipsjoonega on kujutatud Eesti piiri.

Antud HDM-i referentsnivooks on Amsterdami null ning selle DB on nullilähedaseks seatud Taani väinades. Mida rohkem ida (nt Soome laht) ja põhja poole, seda suuremaks kasvab DB, mille tõttu mudeli MSL hälbib ajaloolisest

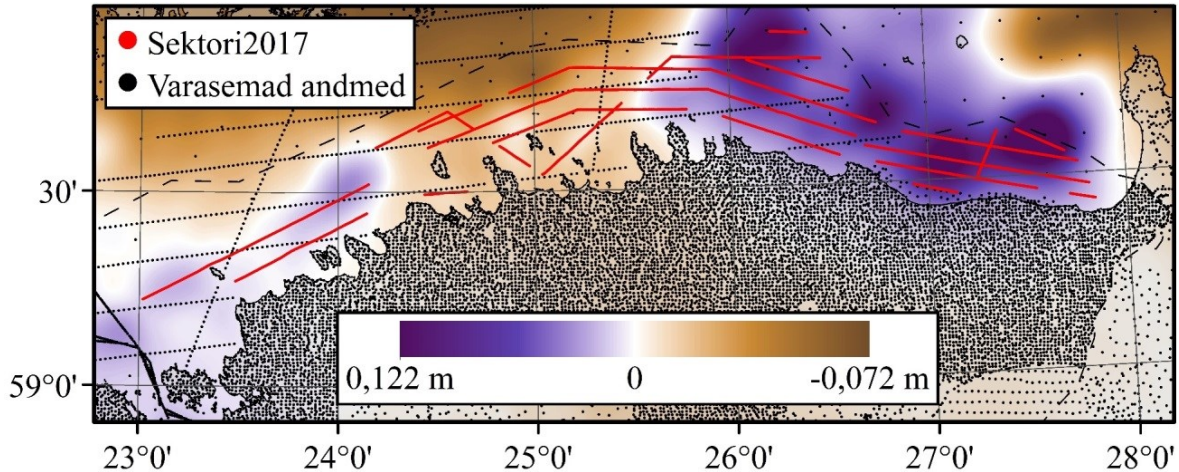
MSL-ist ning seega ka kõrgussüsteemist (EH2000). Selleks, et säärast hälbivust elimineerida, on abiks võetud 7 Eesti põhjarannikul asuvat TG jaama (joonis 4).



### Uute gravimeetriliste andmete mõju geoidi modelleerimisele

Uute graviandmete kaasamine mõjutab oluliselt geoidi modelleerimistulemust (joonis 5). Kui võrrelda EST-GEOID2011 (vt nt Ellmann *et al.* 2011) mudelpinda EST-GEOID2017 (Ellmann *et al.* 2019) pinnaga, siis suurimad muutused ilm-

nevad kohtades, kus varem gravimeetrilised andmed praktiliselt puudusid. Sellised kohad on näiteks Narva laht ja Vaindloo saare lähedased alad (joonis 5). Siinkohal ongi vaja laeval mõõdetud GNSS- või ALS-profiile, et teha kindlaks, kas need erinevused iseloomustavad modelleerimise paranemist või mitte.

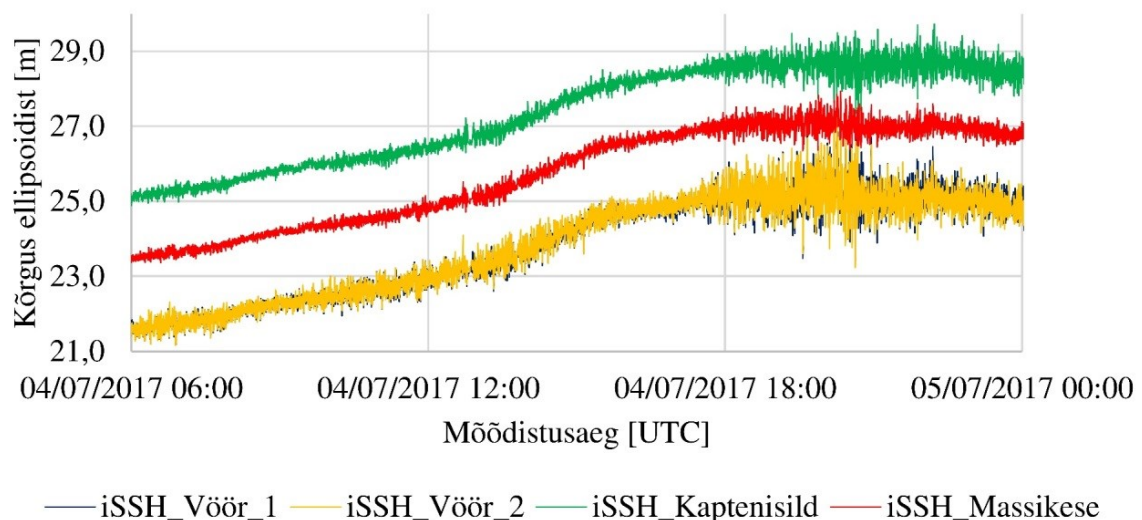


**Joonis 5.** EST-GEOID2011 ja EST-GEOID2017 pindade vahelised erinevused (teine on lahutatud esimesest). Võrdlusest on eemaldatud BK77 ja EH2000 vaheline trend (mudelitele vastavad kõrgussüsteemid). Punaste ja mustade punktidega on kujutatud vastavalt uued ning varem olemas olnud graviandmed. Musta kriipsjoonega on kujutatud Eesti piir.

### Laeval mõõdetud GNSS-profiilide andmetöötlus

Mõõdistustööde ning hilisema GNSS-järeltöötluse tulemusena saadi kolm kõrgusprofiili. Tuleb aga arvestada, et tööde ajal on laev pidevas liikumises, mistõttu peab mõõdistusandmetest elimineerima laeva asendi muutusest tule-

neva vea. Tüüpiliselt kasutatakse selleks inertsiaalandurit (IMU), mida aga antud töös ei rakendatud. Selle asemel arvutati kolmest olemas olnud profiilist lähtudes kõrgusprofiil laeva massikeskmesse. Säärase kalkulatsiooni tulemust saab näha joonisel 6.



**Joonis 6.** Kolme GNSS-antenni mõõdetud hetkeline merepind ja profiil, mille kõrgused on arvatud laeva massikeskmesse. Joonise vasak pool iseloomustab rahulikult ja paremal rahutult tehtud mõõdistusi.

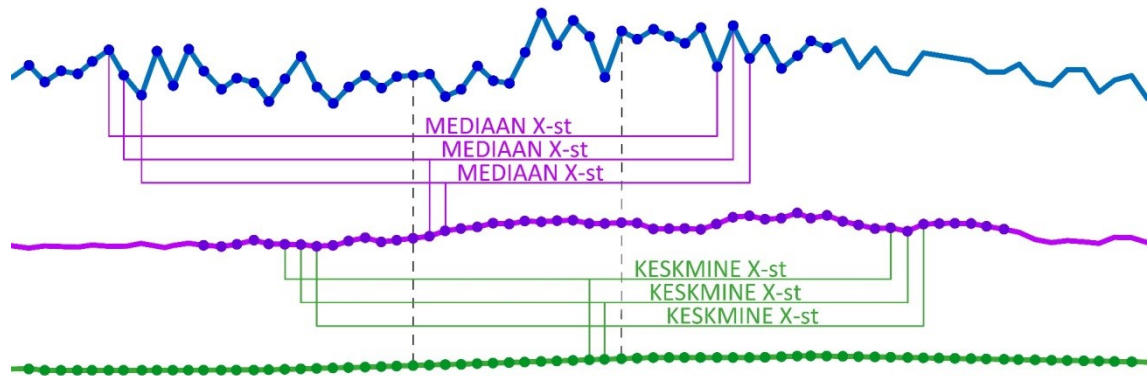
Jooniselt on näha, et massikeskmesse arvatud profiili vertikaalamplituud on väiksem kui GNSS-antennide amplituudid. Võrdlusel iSSH-i andmete (esitatud joonisel 6) ning nende topelt madalpääsfiltreeritud (selgitus järgmises lõigus) vastete vahel annavad järgnevad standardhälbe väärtused (kogu 1249 km ulatuses):

- 1) iSSH\_Vöör\_1 = 0,180 m;
- 2) iSSH\_Vöör\_2 = 0,183 m;
- 3) iSSH\_Kaptenisild = 0,119 m;
- 4) iSSH\_Massikese = 0,088 m.

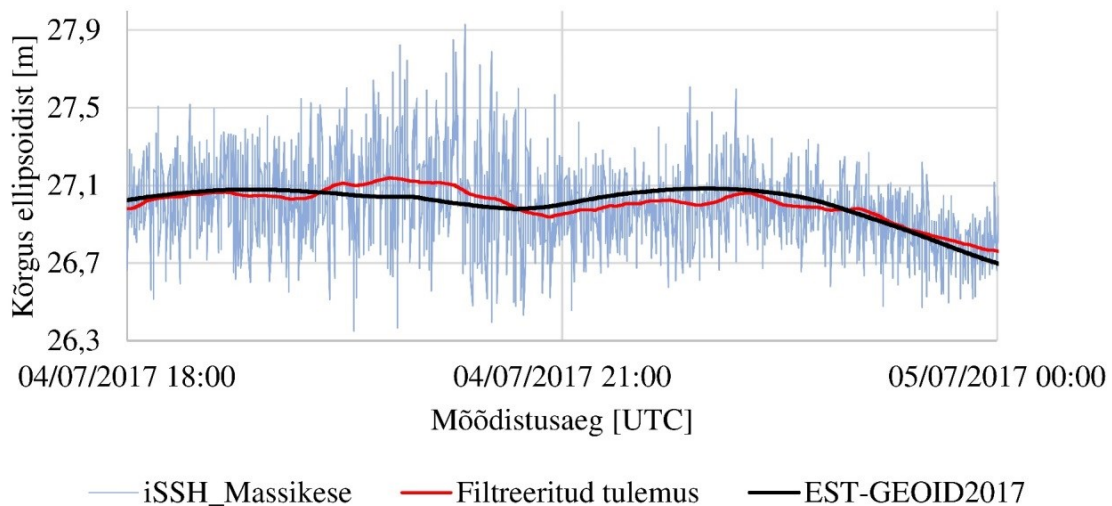
Tulemus näitab, et neljast stabiilseim on massikeskmes olev kõrgusprofiil. Sellest saab järeldada, et arvutus on oluliselt vähendanud laeva asendi muutusest tulenevat viga.

Võrdväärselt oluline on andmetest lainetuse mõju elimineerimine. Selleks kasutati topelt madalpääsfiltrit (Varbla *et al.* 2017b), mis kombineerib liikuva mediaani liikuva keskmisega (filtreerimise skeem on nähtav joonisel 7). Arvestades laeva keskmist liikumiskiirust ning andmete salvestamissagedust (vastavalt 8 sõlme ja 1/15 Hz, mis keskmiselt vastab ligikaudu 3160 meetrile), valiti filtreerimisakna suuruseks 51 mõõtmist (leitud empiiriliselt). Sellest väiksemad

filtreerimisaknad jätavad tulemusse liiga suuri vertikaalvõnkumisi, suuremad aga ei muuda lõpptulemust oluliselt. Liikuv mediaan võimaldab jämedate vigade ning lühiajalise laeva süvise muutuse elimineerimist. Sellele järgnev liikuv keskmine silub tulemust, et see oleks sageduselt geoidi mudelitega võrreldav. Filtreerimine on terve profiili ulatuses pidev (kogu 1249 km). Säärase filtreerimise tulemus on esitatud joonisel 8.



Joonis 7. Topelt madalpääsfiltrit meetodika (siniselt – iSSH; lillalt – iSSH-i mediaanväärtused; roheliselt – filtreeritud tulemus). X tähistab filtreerimisakna suurust (antud töös  $X = 51$ ).



Joonis 8. Filtreerimise mõju mõõdistustulemustele. EST-GEOID2017 on parema võrdluse huvides tõstetud.

Kõige lõpuks on filtreeritud profiilile lisatud DT ( $\bar{D}\bar{B}$ ) arvutatud valemite (4) ja (5) järgi ja kütusekulust tingitud parandid. Viimase määramiseks mõõdeti enne ja pärast mõõdistustöid laeva reelingu kõrgus merepinnast, mille muutus oli ligikaudu 6 cm. See on võetud kogu kütusekulust tingitud parandiks  $F$ . Selleks, et saada parand ajahetkel  $i$ , rakendati lineaarset funktsiooni üle terve marsruudi (laev liikus enam-vähem konstantse kiirusega):

$$F_i = F_{i-1} + \frac{F}{n}, \quad (11)$$

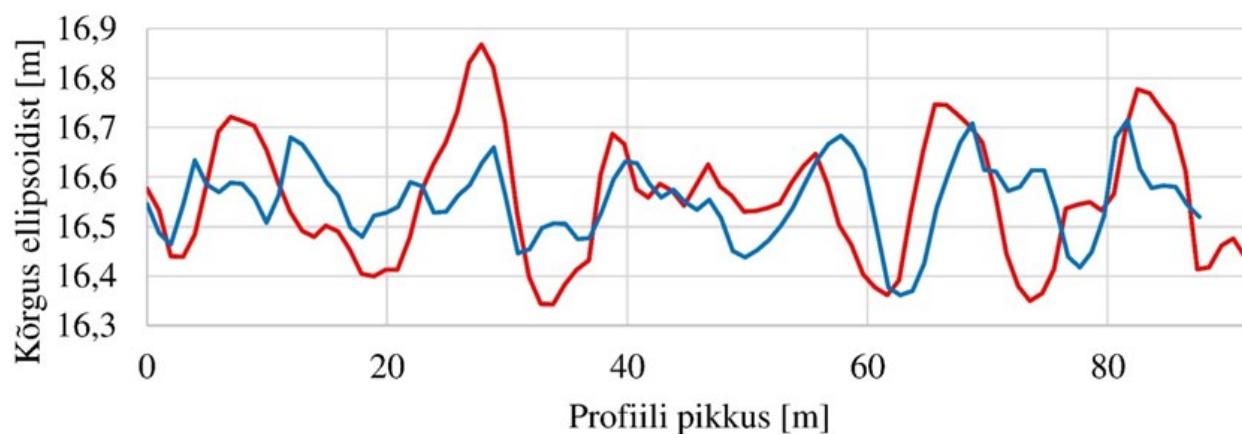
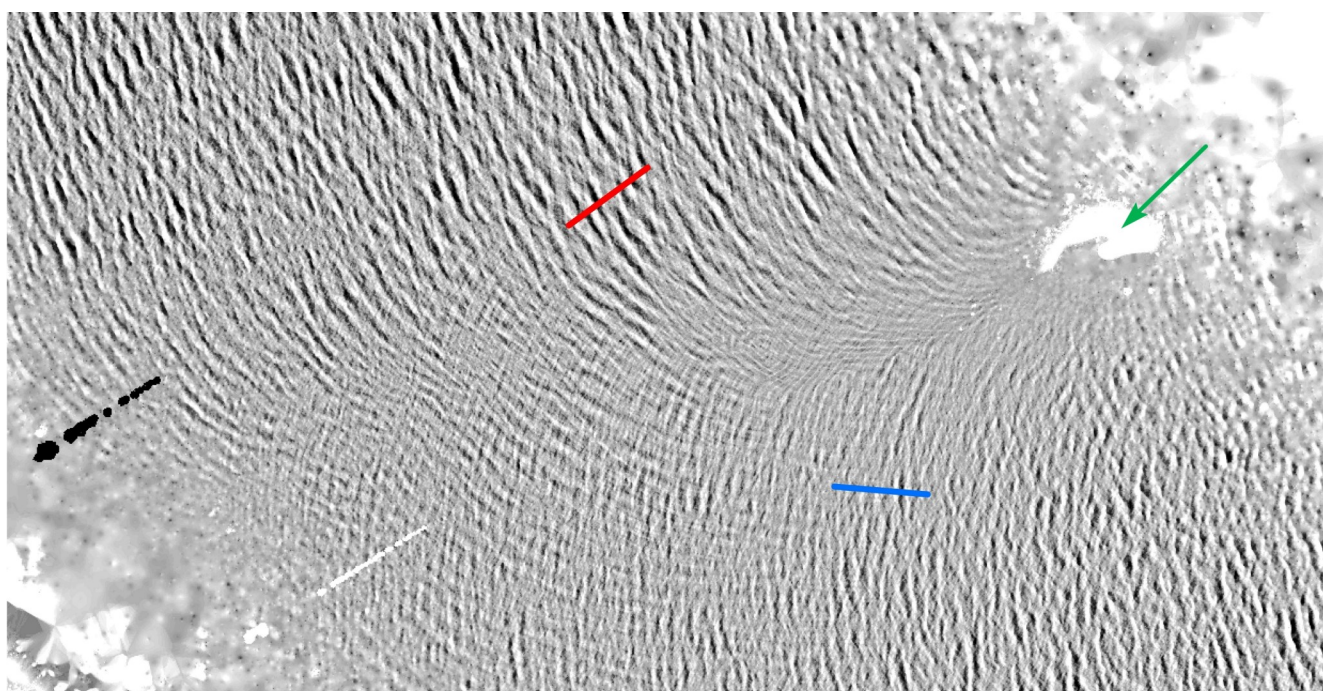
kus  $n$  tähistab teoreetilist (kogu) GNSS-mõõtmiste arvu (st et ka puuduvad GNSS-profiilipunktid on arvesse võetud). Esimene ajahetk  $F_1$  võrdub 0-ga. Kuna laev liikus valdavalt ühtlase kiirusega ja enamasti sügavas vees, siis võib eeldada, et laeva süvise muutus (seisva ja liikuva laeva vahel) on ligikaudu konstantse väärtusega. See on elimineeritud and-

andmetöötluse käigus (detailse selgituse leiab magistriltööst Varbla 2019).

**ALS-profiilide andmetöötlus**

Erinevalt GNSS-andmetest, mis moodustavad juba mõõdistuste järgselt profiili, on ALS-andmed teist tüüpi. Nimelt on tegemist punktipilvedega ja seetõttu tuleb nende töötlemisel võtta teistsugune lähenemine. Seega võrgustati eelnevalt koordineeritud punktipilved kaalutud pöördkauguste meetodil 5 m sammuga. Selleks, et näha, millist tulemust võimaldab Riegl VQ-1560i skanner, tehti mõned arvutused ka 1 m sammuga (joonis 9). Nagu jooniselt võib näha, on merepind jäädvustatud erakordselt detailselt. Säärased andmed võimaldavad uurida näiteks lainedünaamikat (vt kuidas laid mõjutab lainetuse suunda) või hinnata lainetuse kõrgust (vt graafikuid).





**Joonis 9.** Näide lainetavast merepinnast, mis on konstrueeritud ALS-punktipilvest 1 m sammuga. Punase ja sinise joonega on tähistatud graafikul esitatud profiilide asukohad. Mustad ja valged alad joonise vasaku poole alumises osas on võrgustamise artefaktid (samuti nähtavad vasakus alumises ja paremas ülemises nurgas). Rohelise noolega on tähistatud laid.

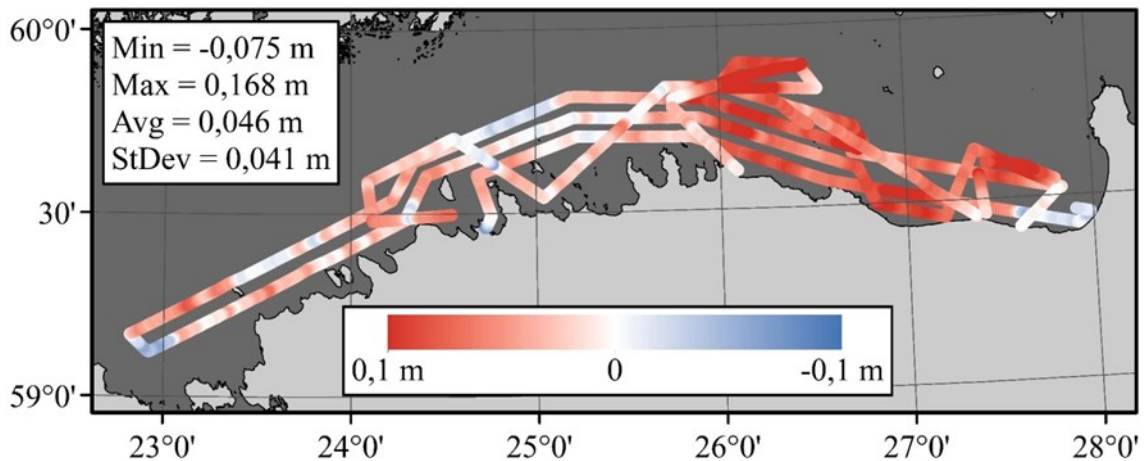
Võrgustamise järgselt filtreeriti saadud tulemused, et andmetest lainetus (vt joonis 9) elimineerida. Selleks kasutati eksponentsiaalset filtrit. Oma olemuselt on tegemist 3D-filtriga, mis rakendab rekursiivse (st taaskasutab juba arvutatud tulemusi) eksponentsiaalse funktsiooni X ja Y suunas (Z on antud juhul kõrgus ehk filtreeritav suurus) ning leiab seeläbi parasjagu filtreeritavale võrgurakule uue väärtuse (kõrguse). Filtri ulatus antud töös on 105 m ehk korruga rakendatakse filtreerimisse 21 (10 + 1 + 10) võrgurakku nii X kui ka Y suunas.

Seejärel tehti filtreeritud võrgustikust väljavõtte iga 62 m tagant mööda lennuki nadiiri projektsiooni. 62 m on keskmine distants kahe laeval mõõdetud GNSS-profiilipunkti vahel – et kaks andmehulka oleks omavahel statistiliselt võrreldavad. Kõige lõpuks lisati saadud kõrgusprofiilile DT parand

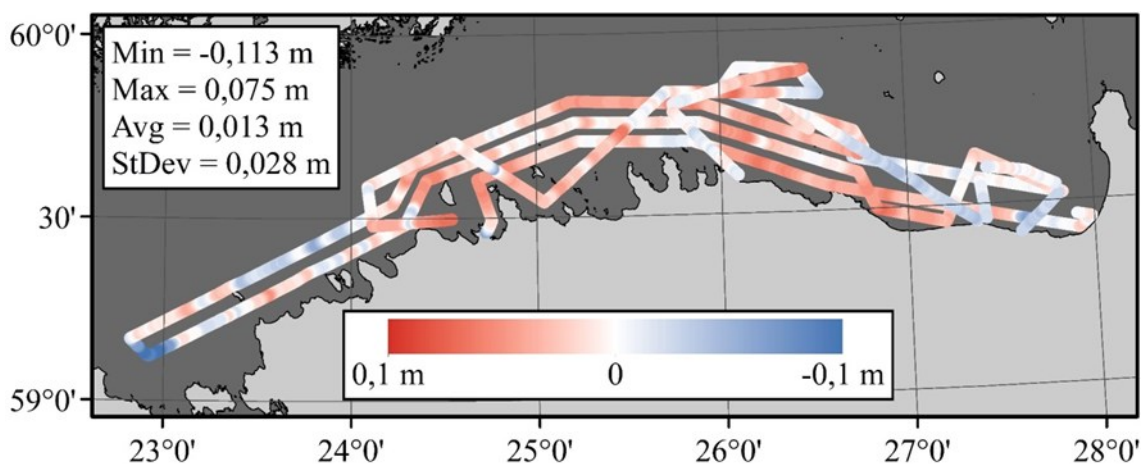
( $\overline{DB}$  on arvatud valemite (6) kuni (8) järgi). Eeltoodud meetodika on välja töötatud empiiriliselt.

#### Geoidi mudelite valideerimine

Võrdlus EST-GEOID2011 (joonis 10) ja EST-GEOID2017 (joonis 11) hälvete vahel tõestab, et varem esitatud erinevused kahe mudelpinna vahel (joonis 5) kujutasid suurelt jaolt tõepoolest paranemist geoidi modelleerimises. Seda näitab ka jooniste 5 ja 10 vaheline korreleeruvus. Jooniseid 10 ja 11 uurides tuleb aga meele pidada, et esitatud hälbed on lisaks geoidi mudelite vigadele ka kombinatsioon mõõtmis- ja DT vigadest. Seega võib eeldada, et mudelid on natuke täpsemad, kui statistilised näitajad aimu annavad.



Joonis 10. EST-GEOID2011 hälbed laeval mõõdetud GNSS- ja ALS-profiilidest. Kokku on võrdlusesse kaasatud 21492 profiilipunkti.



Joonis 11. EST-GEOID2017 hälbed laeval mõõdetud GNSS- ja ALS-profiilidest. Kokku on võrdlusesse kaasatud 21492 profiilipunkti.

Üsna selge on aga see, et suurimad paranemised modelleerimises tulevad esile Narva lahes ning Vaindloo saare juurde jäävatel aladel (võrdle joonist 10 joonisega 11). Ootuspärane on ka see, et maismaast kaugemal on modelleerimise paranemine tuntavam kui selle lähedal. EST-GEOID2017 hälbeid uurides näib, et 26. ja 27. laiuskraadi vahel ning Naissaare ümbruses esineb süstemaatiline hälbumine. Sääraseid alasid tuleks tulevikus lähemalt uurida, kuna need on kohad, kus saaks kõige tõenäolisemalt modelleerimistulemust parandada.

### Kokkuvõte

Käesolev töö näitab, et nii laeval mõõdetud GNSS- kui ka ALS-profiilid on sobivad meregeoidi mudelite valideerimiseks. Mõlemad meetodid eeldavad aga andmete filtreerimist, kuna lainetuse mõju sissejätmine mõjutab valideerimistulemusi. Samamoodi tuleb GNSS-andmetest elimineerida laeva asendi muutusest tingitud vead. Selles osas pakub töö välja IMU-le alternatiivi – kõrgusprofiil arvutatakse laeva massikeskmesse. Küll aga jääb välja selgitada, kuidas kaks meetodit omavahel suhestuvad, mistõttu oleks see aineseks mõnele tulevasele uuringule. Vast et suurimat mõju nii GNSS- kui ka ALS-meetodi tulemustele omab aga

DT parand, mille arvutamine vajab erilist tähelepanu, kuna see on kõige tõenäolisem vigade allikas.

EST-GEOID2011 ja EST-GEOID2017 valideerimine arvutatud profiilidega näitab, et uued gravimeetriselised andmed on märgatavalt parandanud geoidi modelleerimistulemust – EST-GEOID2017 on merealadel täpsem kui varasem mudel. Selliste profiilide kasutamine ei pea piirduma aga ainult meregeoidi mudelite valideerimisega. Näiteks saaks neid kasutada ka gravianomaaliade võrgustamis-meetodite/-tulemuste hindamisel. Samuti oleks põnevaks väljakutseks arvutatud profiilide rakendamine analoogselt GNSS-nivelleerimise kontrollpunktidele, sobitamaks gravimeetriselisi geoidimudeleid huvipakkuvasse kõrguslikku referentsüsteemi.

Lõpetuseks tänan Veeteede ametit ning Maa-ametit ressursside eest, mis võimaldasid Sektori2017 kampaania läbiviimise. Nii Gabriel Strykowski ja Jens Emil Nielsen Taani Tehnikaülikoolist kui ka Jaanus Metsar ja Tõnis Oja Maa-ametist aitasid kampaaniat läbi viia. Anti Gruno ja Karin Kollo Maa-ametist olid abiks GNSS-järeltöölusel. Erko Grünthal Maa-ametist tagas 2018. aasta ALS-punktipilved ning Liisi Kaleva Keskkonnaagentuurist kasutatud veemõõdujaamade toorandmed, mille Karin Kollo hiljem parandas (Kollo ja Ellmann 2019).

**Viidatud kirjandus**

- Allik, A. 2014. Satelliitltimeetria mõõtmiste integreerimine meretaseme prognoosimudeliga: Bakalaureusetöö. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. TTÜR Digikogu: <https://digi.lib.ttu.ee/i/?7017> [04.08.2019]
- Ellmann, A.; Märdla, S.; Oja, T. 2019. The 5 mm geoid model for Estonia computed by the least squares modified Stokes's formula. *Survey Review*. DOI: <https://doi.org/10.1080/00396265.2019.1583848>
- Ellmann, A.; Oja, T.; Jürgenson, H. 2011. Kosmosetehnoloogia rakendused geoidi ja gravitatsioonivälja täpsustamiseks Eesti alal. *Geodeet* 41: 22–25.
- Grünthal, E.; Gruno, A. 2017. Maa-ameti uus aerolaserskanner Riegl VQ-1560i. *Geodeet* 47: 44–45.
- Kollo, K.; Ellmann, A. 2019. Geodetic reconciliation of tide gauge network in Estonia. *Geophysica* 54: 27-38.
- Lagemaa, P.; Elken, J.; Kõuts, T. 2011. Operational sea level forecasting in Estonia. *Estonian Journal of Engineering* 17 (4): 301–331. DOI: <https://doi.org/10.3176/eng.2011.4.03>
- Lagemaa, P. 2012. Operational forecasting in Estonian marine waters: Doktoritöö. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. TTÜR Digikogu: <https://digi.lib.ttu.ee/i/?714> [04.08.2019]
- Liibusk, A.; Ellmann, A.; Kõuts, T.; Jürgenson, H. 2013. Precise Hydrodynamic Levelling by Using Pressure Gauges. *Marine Geodesy* 36(2): 138–163. DOI: <https://doi.org/10.1080/01490419.2013.771594>
- Varbla, S.; Ellmann, A.; Metsar, J.; Oja, T. 2017a. Meregravimeetrilised mõõdistused Soome lahel projekti FAMOS raames. *Geodeet* 47: 39–43.
- Varbla, S.; Ellmann, A.; Märdla, S.; Gruno, A. 2017b. Assessment of marine geoid models by ship-borne GNSS profiles. *Geodesy and Cartography* 43(2): 41–49. DOI: <https://doi.org/10.3846/20296991.2017.1330771>
- Varbla, S. 2019. Assessment of marine geoid models by shipborne GNSS and airborne laser scanning profiles: Magistritöö. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. TTÜR Digikogu: <https://digi.lib.ttu.ee/i/?12483> [04.08.2019]